

# 富良野盆地地区における農業基盤に関する工学的研究

著者	古川 克彦
学位名	博士（工学）
学位の種別	課程博士
報告番号	甲第313号
研究科・専攻	工学研究科・建設工学専攻
学位授与年月日	2011-09-29
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/687">http://hdl.handle.net/10258/687</a>

博士論文題目

富良野盆地地区における農業基盤に関する工学的研究

室蘭工業大学大学院工学研究科

建設工学専攻

古川 克彦

## 目次

和文要旨	1
英文要旨	2
第 1 章 緒論	3
1. 背景	
2. 既往の研究	
3. 目的	
4. 本論文の構成	
第 2 章 富良野盆地地区の概要	7
1. 地勢	
2. 気候	
3. 水系	
4. 土壌	
5. 農業	
第 3 章 富良野盆地地区の土壌特性	29
1. 緒言	
2. 土壌水分と強熱減量の関係	
3. 栄養塩吸着量におよぼす土壌粒径の影響	
4. 富良野盆地南部の平地圃場の硫酸塩分布	
5. 統計学的解析	
6. 結言	
第 4 章 土壌粒子および農業用資材の粒径分布測定	51
1. 緒言	
2. 理論	
3. 実験装置及び方法	
4. 実験結果及び考察	
5. 結言	

第 5 章 地下かんがいシステムを備えた圃場の土壌特性	65
1. 緒言	
2. 水田圃場	
3. 畑地圃場	
4. 結言	
第 6 章 地下かんがいシステムへの導入する用水流量測定法	89
1. 緒言	
2. 堰式流量計	
3. オリフィス式流量計	
4. 筒型流量計	
5. 結言	
第 7 章 結論	136
引用文献	137
謝辞	143



## 和文要旨

本研究の目的は富良野盆地地区における土壌と地下かんがいシステムの特性を検討することである。

富良野盆地地区の丘陵地に位置する畑地圃場の作土層に関する基礎的データの収集を目的として、イオン吸着量と土壌粒径の関係について実験的に検討した。目開きが 2.360–0.075 mm の JIS 標準篩を用いて土壌試料の乾式篩い分けを行い、粒径分布、水分、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 、EC、強熱減量、カリウムイオン量、マグネシウムイオン量、硝酸イオン量、硫酸イオン量を測定した。粒径が 0.250 mm 以上の土壌粒子に比べて、粒径が 0.250 mm 未満の土壌粒子には強熱減量成分が多く含まれていること、電解質を吸着しやすいことがわかった。また、粒径が 0.250 mm 未満の土壌粒子は陽イオンよりも陰イオンを吸着しやすいことがわかった。富良野盆地南部に位置する平坦部の畑地圃場において、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ と硫酸イオン含有量の深さ方向分布に反比例関係が見られた。十勝岳泥流跡地である富良野川およびヌッカクシ富良野川から東へ離れるほど硫酸イオン含有量が少なくなる傾向にあることがわかった。沈降法の一つである浮力秤量法により球形ガラスビーズ、JIS 試験用粉体、マグネサイト、軽焼マグネシア、玉ねぎ畑の土壌について粒径分布を測定し、篩い分け法、レーザー一回折散乱法と比較した。

富良野盆地地区の平坦部にあるかんがい排水施設を備えた一般的な圃場と既設暗渠利用型の地下かんがいシステムを備えた圃場の違いを明らかにすることを目的として、土壌の  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 、EC、土壌硬度、強熱減量、硫酸イオン含有量の深さ方向分布を検討した。一般的なかんがい排水施設を備えた圃場と地下かんがいシステムを備えた圃場を比較すると、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 、EC、土壌硬度、強熱減量の深さ方向分布および季節変化に大きな違いは見られなかった。硫酸イオン含有量は、地下かんがいシステムを備えた圃場の場合は春期に比べて秋期の方が若干大きい、両圃場とも深さ方向分布はほぼ同様であった。給水方法の違いは土壌特性に大きな変化を起こさないことがわかった。

地下かんがいシステムを備えた圃場に供給する流量を測定するため、堰式・オリフィス式・筒型流量計を設計した。導入流量は液高さによって測定できる。スケールアップにより設計した堰式・オリフィス型流量計を用いて富良野盆地での現地試験を行った。本研究で設計した流量計によって農業用水の導入流量を測定できる。

## ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the characteristics of soil and sub-irrigation system at the Furano Basin.

We experimentally investigated the relationships between the amount of adsorbed ions and the particle sizes of soil in order to collect basic data on the plow layer of fields in which crops other than rice are cultured in the hills of the Furano Basin. The soil samples were sieved using JIS standard screens with openings between 0.075 mm and 2.360 mm, and then measured the particle size distribution, water content, pH(H<sub>2</sub>O), EC, ignition loss, potassium ion concentration, magnesium ion concentration, nitrate concentration, and sulfate concentration. Soil particles under 0.250 mm had a larger ignition loss component and more easily adsorbed electrolytes compared to soil particles with a size of 0.250 mm or more. Furthermore, soil particles under 0.250 mm were found to adsorb cations more easily than anions. In addition, the depth direction profile of pH(H<sub>2</sub>O) and the content of the sulfate was a relation of inverse proportion in the field located in the southern area of the Furano basin. The content of sulfate has decreased by leaving from the Furano river and the Nukkakushi Furano river. The particle size distributions of the JIS Test Powders, minerals and onion farm soil were measured by the buoyancy weighing method.

To elucidate differences between a field with typical drainage system and the field with sub-irrigation system that use existing irrigation and drainage water channels in the flat land at the Furano Basin, we investigated the distribution profiles in the vertical direction of fields in terms of soil pH (H<sub>2</sub>O), EC, soil hardness, ignition loss, and sulfate content. The vertical profiles of these two types of fields did not exhibit major differences in their pH (H<sub>2</sub>O), EC, soil hardness, ignition loss, and their seasonal changes. Although rice paddies with sub-irrigation systems had a slightly higher sulfate concentration in spring than in autumn, both types of fields had similar vertical distribution profiles. Hence, these two methods do not result in major differences in the soil characteristics.

For measuring the introductive flow rate to a field with a sub-irrigation system, the weir, orifice and cylinder type flow meters were designed. The introductive flow rate was measured by liquid height. Field works at Furano basin were carried out using the weir and orifice type flow meters designed by scale up. We confirmed that the introductive flow rate can be measured by the weir and orifice type flow meters.

## 第1章 緒論

### 1. 背景

富良野盆地は北海道のほぼ中央に位置し、富良野市、中富良野町、上富良野町にまたがる水田地帯であり、主要作物は水稻、玉ねぎ、メロン、にんじんなどである。富良野盆地では生産性の高い農業基盤の形成、農業振興、地域活性化等を目的として、平成20年度から中富良野町の平坦地において国営農地再編整備事業が行われている。中富良野町の農業要覧(中富良野町産業建設課, 2007)によれば、平成19年現在で平坦部にある水田総面積は3094 haであるが、そのうち水稻の栽培に利用されている耕地面積は1217 haであり、その他の耕地は玉ねぎや小麦などの栽培に利用されている。一方、富良野盆地の丘陵部にある畑地面積は牧草地を含めて1246 haであり、平野部の水稻栽培面積と同等の耕地面積である。丘陵部においても玉ねぎや小麦など、平坦部と同じ野菜・穀物類も生産されているが、甜菜糖の原材料となる甜菜、ワインの原材料となるブドウなど、平坦部と異なる作物が栽培されている。また、香料の原料となるラベンダーの栽培も盛んに行われており、丘陵部に位置する畑地圃場は平坦部の圃場と同様に生産基盤として、また、観光資源としても重要である。丘陵部圃場で生産力強化のための整備を行うには作土層を形成する土壌の特性を把握しておく必要がある。農業用資材として利用される石灰石や苦土の供給形態は粒状、粉状をはじめ、粉状粒子を造粒したものなど多岐に渡る。石灰石や苦土といった資材を利用する上でも粒径分布を知ることは非常に重要である。また、農地の栄養塩保持や排水性を議論する際、土壌粒子の粒径分布は重要な基本情報である。

また、農業生産基盤の維持には治水・利水が重要であり、かつては、水源である河川の氾濫防止や用水路の整備が行われ、さらに新田開発による生産基盤の拡大や排水施設整備による湿田の乾田化などの生産基盤強化を目的とした土地改良が行われてきた。近年は農業技術が飛躍的に進歩するとともに、集落営農組織等による農業経営がはじまった。しかし、これまでの圃場は狭小であること、経営耕地が分散していること、などが課題となり生産基盤の強化が十分に行えないところもあった。これを解決するため、大区画化をはじめとする農地整備が必要となってきた。北海道の年平均降水量は約1000 mmであり、日本の年平均降水量(約1600 mm)の70%程度である。しかし、実際に使用できる水量は降水量に対して取水量基準で1割にも満たない。取水した水は、生活用水、工業用水、農業用水として使用されているが、ほとんどは農業用水として使用され、その用途はかんがい用水が主である。水資源の有効活用を考える場合、農業用水から検討する必要がある。圃場に供給された用水は作土層を通過して圃場地下に浸透する。泥炭質などの土質の圃場では、排水改善のための暗渠管を埋設するのが一般的である。暗渠管は地下約0.7–0.9 mの深さに約10 m間隔で設置されており、地表の残留水や土壌中の過剰な重力水を排水する。

近年，この暗渠を活用した地下かんがいシステム(稲葉・花山，2003；北海道空知支庁東部耕地出張所，2006)による圃場の地下水位調整が注目されている．地下かんがいシステムは，暗渠管によって圃場の余剰水を排水するかんがい排水機能と，渇水期等において暗渠管を通して地下に水を導き，圃場の地下水位を上昇させることによって作土層に水を供給する機能を併せ持っている．地下かんがいシステムの特徴として，(1) 水みちができ水田が早く乾く，(2) 水温が上がり発芽が早い，(3) 地下水位の制御が可能である，(4) 小麦などの畑作物の収量が向上する，(5) 暗渠管内の泥土が取れて排水効果が長期間持続する，が挙げられている．これら以外にも，既設暗渠管を利用してシステムを構築できる，スプリンクラー散水と異なりかんがい中も圃場で作業が可能である，といった利点がある．また，地表からの散水では温まった表土と水が接触すると，水の一部が蒸発し，作土層に浸透しない．そのため，地下かんがいシステムを備えた圃場では用水の有効利用が可能となる．

地下かんがいシステムを導入した圃場の用水流量は  $2.5 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  が適正(呼び径 150 mm のパイプで液高さ 2.5–3 cm が目安)とされており(北海道空知支庁東部耕地出張所，2006)，圃場の機能を最大限引き出すには暗渠管に導く用水流量が重要な因子である．しかし，作土層を構成する土壌には密度分布，粒径分布，空隙分布があり，圃場ごとに土質が異なる．暗渠管に導く用水流量が大きすぎると作土層が流動化する恐れがあるとともに，圃場全体に水を均等供給できない可能性がある．一方，流量が小さすぎると作土層に十分な水が行き渡るまで時間を要する．また，呼び径 150 mm のパイプの液高さを目安とする場合，液高さが少しずれただけでも流量が大きく変わる．流量を正確に測定する場合，面積流量計やオリフィス流量計等を用いる方法がある．しかし，これらの流量計は高価であり，持ち運びや移設が容易ではない．また，呼び径 150 mm のパイプで液高さ 2.5–3 cm を目安とする方法は開水路型用水路に接続された圃場の場合であり，農業用水路は将来開水路型から閉水路型へと切り替えられることが予想されている．閉水路型用水路に接続された地下かんがいシステムへ導入する用水流量の測定法を確立する必要がある．

## 2. 既往の研究

北海道の泥炭土壌について検討した報告は多数見受けられる(宮地ら，1995；近藤，1978；庄子・松実，1962)．しかし，深さ方向分布に着目した報告は散見される程度である(石渡，2006；橋本，2006)．また，これらの報告は地域性が強く，知見を富良野盆地地区にそのまま適用するのは困難である．

富良野盆地は一般的な泥炭地と異なり，一部の土地および河川が十勝岳噴火の影響を受けた酸性硫酸塩土壌でもある．水野ら(1992)は，1926年に発生した十勝岳泥流の影響を検討するため，1991年に十勝岳泥流跡地である富良野川沿いの水田土壌のイオウと鉄の含有率を調査している．また，上富良野町(1995)では，上富良野町と富良野盆地を流れる河川に沿って水田土壌を調査するとともに，富良野盆地を流

れる河川の硫黄運搬量について検討し、富良野川、ヌッカクシ富良野川の硫黄運搬量が特に多いことを報告している。ヌッカクシ富良野川は東5線北9号付近でデボツナイ川と合流している。そのため、デボツナイ川の下流側である富良野盆地南部はヌッカクシ富良野川由来の硫黄分の影響も受けていると考えられる。

微粒子の粒径分布測定法には、写真撮影等による画像解析法(栗山ら, 2000)、レーザー回折散乱法(簗島ら, 2005)、アンドレアゼンピペット法(化学工学会, 1988)、沈降天秤法(福井ら, 1998; Oden, 1925)、遠心沈降法(荒川ら, 1984)等がある。画像解析法は正確な粒径測定が可能であるが、大量のサンプルによる測定が必要である。レーザー回折散乱法は測定精度が良く、粒径分布が広い場合でも短時間で測定可能であるが装置価格が非常に高価で容易に入手できない。一方、アンドレアゼンピペット法、沈降天秤法、遠心沈降法等は液中での粒子移動速度を測定し、Stokes の式から粒径を求める方法である。これらは測定手法の修得に時間を要するなどの課題がある。沈降天秤法は皿上に堆積した粒子質量を測定しているが、系に存在する粒子量が一定であるとすれば、粒子の物質収支から沈降中の粒子質量を測定することで沈降した粒子質量を求めることができる。よって、沈降中の粒子質量を測定することができれば粒径分布を求めることができる。沈降法による測定は粒径の物理的意味が明確であり、水の移動が関与する農地土壌や農業用資材の検討を行いやすい。浮力秤量法(Obata *et al.*, 2009)は懸濁液中の粒子移動に伴って生じる懸濁液の密度変化を懸濁液中に吊るした秤量棒に作用する浮力として検知し、秤量棒長さ、秤量棒質量の経時変化から粒径分布を求める沈降法の一つである。本測定装置は電子天秤とパソコン、懸濁液の密度変化を感知するための懸濁液中に吊るす秤量棒から構成される。装置構造が簡単であるため、装置は安価で作製できる、メンテナンスがしやすい、特殊な測定技術を要しない、自動測定が可能である、などの利点がある。

一般的ながんがい排水施設を備えた水田では用水を地表側から供給する。供給された用水は作土層を通過して水田地下に浸透する。粘土質などの水はけの良くない土質の水田では、排水改善のための暗渠管を埋設する(萩野・村島, 1985)。暗渠管は地下約 0.7–0.9 m の深さに約 10 m 間隔で設置されており、地表の残留水や土壌中の過剰な重力水を排水する(萩野・村島, 1990)。近年、この暗渠を活用した地下かんがいシステムによる圃場の地下水位調整が注目されている(福本ら, 1992; 矢部・谷川, 1992; 藤森, 2007; Zhang *et al.*, 2007)。地下かんがいシステムは、暗渠管によって圃場の余剰水を排水する機能と、渇水期等において暗渠管を通して地下に水を導き、圃場の地下水位を上昇させることで作土層に水を供給する給水機能を併せ持っている。地下かんがいシステムの特徴として、水みちができるため水田が早く乾くこと、地下水位の制御が可能であること、暗渠管内の泥土が取れて排水効果が長期間持続すること、スプリンクラー散水と異なりかんがい中も圃場で作業が可能であることなどが挙げられる。また、泥炭地にある圃場は落水後の地盤沈下が問題となる(宮地ら, 1995)ことが多いが、貯水により地盤沈下を抑制する効果も期待されている。こ

れまで、地下かんがいシステムについては日本各地で検討がなされてきた(松原ら, 1985a, 1985b). 北海道においては、美唄地区や中樹林地区(河端ら, 2008)などに地下かんがいシステムが導入されている。また、地下かんがいシステムは全国各地で導入、または、導入が検討されている。

### 3. 目的

本研究では、圃場整備などを通して農業を支援することを目的として、富良野盆地地区をモデルとして検討を行った。富良野盆地地区の土壌特性を把握するため、水田および畑地における土壌の物理的・化学的性質を調査した。さらに農業用資材および土壌の粒径分布測定について検討を加えた。また、地下かんがいシステムを備えた圃場と一般的なかんがい圃場の違いを明確にするため、栄養塩などの深さ方向分布におよぼす用水供給方法の影響を実験的に検討した。続いて、地下かんがいシステムの機能を引き出すために必要な用水流量測定法の開発を目的として、ベルヌーイの定理に基づく簡易流量計の設計・開発を行った。

### 4. 本論文の構成

本論文は7章から構成される。

第1章は緒論であり、本研究の背景、既往の研究、本研究の目的について述べた。

第2章では、本研究の対象となる富良野盆地地区の地勢、気候、水系、農業についてまとめた。

第3章では、富良野盆地地区の土壌特性について検討した。

第4章では、土壌粒子および農業用資材の粒径分布測定を目的として沈降法である浮力秤量法を中心に粒径分布測定法について検討した。

第5章では、地下かんがいシステムを備えた圃場と一般的なかんがい圃場を水田・畑地に大別してそれらの土壌特性を比較・検討した。

第6章では、地下かんがいシステムへ導入する用水流量測定器として、堰式、オリフィス式、筒型流量計を実験室スケールで検討するとともに、現地試験でその有効性を検証した。

第7章では、本論文で得られた知見を総括した。

## 第2章 富良野盆地地区の概要

### 1. 地勢

図2-1（富良野土地改良区，2010）に示すように，富良野盆地は北海道の中部，上川総合振興局南部にある空知川流域で，上富良野町，中富良野町，富良野市からなる．盆地東側に大雪山系十勝岳連峰，南西部に夕張山系芦別岳の諸峰，北西には上川・空知の郡界をなす丘陵地帯に囲まれている．標高は概ね170～340mで，盆地周辺の丘陵地帯は主として十勝岳熔結凝灰岩で構成されている．盆地内の中富良野町を中心とした平地は明治期の入植以前は低湿地帯で，富良野湖と呼ばれていた．湿地帯であった名残が現在も鳥沼や北大沼などの地名として残っている．富良野盆地には活動中の十勝岳周辺を源流とする富良野川やヌッカクシ富良野川から大量の硫黄化合物が流れ込んでいる．そのため「硫黄の臭気のある水のたまっている土地」を意味するアイヌ語である『フーラヌイ』と呼ばれ，これが富良野の語源になっているとされている．

図2-2および表2-1に富良野土地改良区の賦課面積を示す．富良野盆地は水田地並びに周辺丘陵畑地からなる．水田地の面積はおよそ4,600haである．内訳は水田における平原地区3,258haと，大正15年5月の十勝岳噴火による泥流被害（上富良野町，1975）のあった富良野川沿いの草分地区と平原地区のそれぞれ一部628ha，745haである．周辺丘陵地には本幸地区，新田中地区及び吉井地区が属し，畑作に供されている．その耕地面積は牧草地を除くと約1,100haある（富良野土地改良区，2009）．

### 2. 気候

富良野盆地地区は内陸性気候で冬の厳寒（ $-25^{\circ}\text{C}$ ）と夏の酷暑（ $30^{\circ}\text{C}$ ）という二面性をもつ．年間平均気温は $6.1^{\circ}\text{C}$ で全道平均より低いが，かんがい期（5月～9月）の平均気温は $16.9^{\circ}\text{C}$ である．年平均降水量は978.1mm（中富良野町，昭和54年から平成12年の平均値），かんがい期の平均降水量は489mmである．根雪期間は平年で11/26から4/6で，無霜期間は5月中旬から10月中旬である．農業気候として重視される7，8月の最高気温は $25.8^{\circ}\text{C}$ あり，旭川と共に全道1位で農作業上決定的な好条件である．

### 3. 水系

図2-3に富良野盆地地区を流れる河川を示す．主要な河川として，富良野川，ヌッカクシ富良野川，デボツナイ川，ベベルイ川がある．それぞれの河川は空知川に合流し，滝里ダム湖に流下する．

富良野川は上富良野町において江幌完別川（トラシ江幌完別川，エバナ江幌完別川，30号川，29号川並びに27号川が合流）やコルコニウシベツ川が流入し，富良野市の下流域で中央大排水路（デボツナイ川とヌッカクシ富良野川が人工的に合併された排水路）とベベルイ川並びにシブケウシ川とが合流して空知川に流入する．富良野川並びにヌッカクシ富良野川はその源流が活火山である十勝岳であるため，硫酸塩を多く含み，pHが4.9～5.5の強い酸性を示す（北海道開発局旭川開発建設部，2007）．

ヌッカクシ富良野川は旭野川や中富良野町北19～20号間でホロベツナイ川が流入し，北9～10号間でデボツナイ川と人工的に合併して中央大排水路となり富良野川に流入する．明治開拓当初，ヌッカクシ富良野川並びにデボツナイ川両河川が尻無川であったため周辺原野の洪水氾濫が多かった．これら洪水氾濫の防止と周辺原野の排水乾燥化促進を図る目的で，富良野土功組合により大正7～8年にかけて中央大排水路が計画・施工された（富良野土地改良区，1975c）．富良野川同様，十勝岳の影響を受けているためヌッカクシ富良野川のpHは上流部で4.5を示す．しかし，デボツナイ川と合流した下流部でのpHは6.6である（北海道開発局旭川開発建設部，2007）．

ベベルイ川は死火山である富良野岳を源流とし，イナヒロボ川，冷水川，長岡牧場内沢，八号沢川，六号沢川，東8線川並びに北1号川が途中で流入し，富良野川に流入する．死火山である富良野岳周辺を源流としているため，硫黄分は無く無臭であり，pHは6.5～7.1でほぼ中性に近い．

空知川は南富良野町の狩振岳を源流する石狩川水系に属する一級河川である．前述した主要4河川その他，富良野市から西達布にかけて布部川，布礼別川，西達布川などが流入している．

#### 4. 土壌

地力保全基本調査成績書（北海道立中央農業試験場，1975b）によれば，富良野盆地地区の周辺丘陵地のうち，本幸地区の土壌は安井統に，新田中地区と吉井地区は上富良野統に属する土壌が多く，どちらも耕作層は埴壌土か砂壌土で，深さはまちまちであるが熔結凝灰岩が底部にある．

低湿地帯であった富良野湖跡である富良野盆地の平坦な地域（主に水田）は，永年の客土などによる土地改良によって表層0.3～0.5m程度は作土であるが，その下は泥炭土壌である．泥炭土壌の一般的な性質（庄子，1976；土地保全調査事業全国協議会，1991）として，過湿，熱伝導率が小さい，強酸性，窒素放出量が多い，塩基類に乏しい，排水による収縮が大きい，地耐力が小さい，などが挙げられる．泥炭土壌はさらに低位泥炭土と高位泥炭土に分類され，低位泥炭土は富栄養であるが，雨水によつての



み涵養された高位泥炭土は貧栄養である。

表 2-2 に水田土壌区分を示す。富良野地域の泥炭土は、低位泥炭土が主で一部高位泥炭土も見られる。低位泥炭土はヨシ・イヌスギナ泥炭で富栄養性であるため水田利用が多い。高位泥炭土は、ヤチヤナギ・ミズゴケ泥炭で、畑地利用が多い。中富良野を中心とした土壌区分では水田に関して 16 統あるが、平原、草分及び東中地区の土壌区分を見ると概ね 7 統、その合計は 4,761ha で、水田合計面積 5,475ha の 87% を占める。表 2-3 に面積の多い順に土壌区分を示す（北海道立中央農業試験場，1975a）。これら土壌統の断面柱状図を見ると、東中統以外は作土層の下は泥炭か黒泥で酸化沈積物が混ざっている。東中統は作土層下が黄色埴壌土である。作土層の厚さは 10～30cm である。また、作土層は中富良野統では腐植をすこぶる含み（10%以上）、それ以外の統においても腐植に富む。

中富良野地域において低位泥炭土地域は開拓当初から水田として利用され、昭和 30 年代までは国策として米（主食）の生産増大に寄与してきた。しかしながら、大型機械化や肥料の投入等により生産性が大幅に向上し、一方で米の消費量が漸減したため、米の在庫が増大し、昭和 45 年から生産調整（減反政策）が行われた。当地域でも減反により多くの水田が畑に転作されてきており、タマネギやニンジンの主産地となってきた。

泥炭土壌の母材は水生植物（泥炭構成植物）の遺体が長年にわたって堆積したもので、富良野盆地の低位泥炭土はヨシ・イヌスギナ、高位泥炭土はヤチヤナギ・ミズゴケである。低位泥炭土は富栄養であるが、雨水によってのみ涵養された高位泥炭土は貧栄養である。北海道における低位泥炭土の有機物含有量は平均 63% であり、ドイツの泥炭土に比べ有機物は少ない。泥炭土壌の一般的な性質は、過湿である、熱伝導率が小さい、強酸性である、窒素放出量が多い、塩基類に乏しい、排水による収縮が大きい、地耐力が小さい、などである。一般的な泥炭土は酸化鉄が多いが、富良野盆地地区では「水源地に硫黄山ありて硫化鉄多し」と記述する古文獻（富良野土地改良区，1975a）があるように、十勝岳の影響により硫化鉄が多い。そのため、硫酸酸性土壌でもある。

## 5. 農業

### (i) 沿革

富良野盆地内を代表して中富良野町の農業について、富良野土地改良区史（富良野土地改良区，1975a，1975b，1975c，1975d，1975e）ならびに空知川右岸地区事業誌（北海道開発局旭川開発建設部，2007a，2007b）からその概要を記す。

明治 19 年に富良野原野植民地選定があった後、明治 28 年伊藤喜太郎氏

が中富良野町西中部部落に入地したのが始まりで、同 31 年には櫻坂源三郎氏が水稻の試作を行い、富良野地方での稲作の元祖とされている。大正 6 年には開拓民の食糧確保を目的として、泥炭地を水田にするための排水事業を進めることを目的として富良野（排水）土功組合が設立された。この組合は後に富良野用水土功組合を経て各土地改良区となり、平成 12 年これら土地改良区が合併し現在の富良野土地改良区となっている。

大正から昭和初期にかけて排水幹線の整備と共に、用水についても導水門や各幹線用水路の整備が進められた。この用水路整備に関しては、富良野川などが硫黄分を多く含んだ酸性水であることや、ベベルイ川など十勝岳山系からの低温融雪水の流入など、流入する河川水の諸問題を解決するために必要とされた。入植以来用水に関しては農民間の様々な紛争が絶えなかったが、大正 12 年に山手幹線用水路が 21km にわたって開削され、空知川の水を 3,000ha の農地に灌漑したほか、東幹線や中央幹線、河西幹線なども整備された。ただし、山手幹線以外については河川水の問題の根本的な解決とはならなかった。戦後、用水施設の整備の主だったものは、国営総合かんがい排水事業富良野地区が昭和 27 年に着工され、同 33 年には空知川頭首工及び幹線用水路の改良工事が進められた。42 年に国営附帯道営かんぱい事業富良野地区起工、45 年国営総合かんがい排水事業富良野地区が竣工した。43 年に竣工した布部川頭首工から取水された水は導水路を経て山手幹線に導入された。これにより、空知川頭首工の取水不足も改善された。その後、国営かんがい排水事業空知川右岸地区において改めて山手幹線用水路が平成 6 年に着手され、同 18 年に事業が完了している。

現在の中富良野町内におけるその他の用水路（幹線用水路からの支線）は計画を含めて以下のとおりである。

#### < 平原地区 >

##### ① 第 100 幹線

山手幹線零号から取水し南大沼、北大沼地区等に給水。

##### ② 第 200 幹線

山手幹線北 6 号から取水し、西鳥沼、北大沼、宇文、共同、寿、日進、鹿討地区等に給水。

##### ③ 第 500 幹線

山手幹線北 11 号から取水し、宇文、旭中各地区等に給水。

##### ④ 第 600 幹線

山手幹線北 13 号揚水機場を経由して北 10 号東 3 線から取水し、報徳、旭中、西中地区等に給水。

#### < 東中地区 >

##### ① 山手支線

山手幹線北 13 号東 9 線から取水し，旭中，報徳地区等に給水．

## ②東中第 1 用水路

北 20 号頭首工から取水し，東中各地区に給水．

泥炭土壌については水田用の耕作土としては不適なため粘土客土が必要であったが，泥炭地に粘土を客入する改良方法が考案されたのは明治 41 年で，多寄村の富生藤吉氏による．この改良方法が考案されたことにより，泥炭土壌の水田の改良が進み，生産量の増大に大きく寄与した．富良野地域においては大正 8 年に人力客土が行われたのが最も古く，運搬距離にも限界があるため近くの河川堆積土を使うことが多かった．その後，運搬距離を伸ばし良質な粘土を客入するため写真 2-1 のような馬搬客土が行われるようになった．この時の土取り場は東 9 線北 12 号と基線北 12 号の村有地であった．昭和 26 年からの軌道客土(写真 2-2)には鹿討部落西部の粘土が使われるようになってるとともに，昭和 27 年 8 月には道営軌道客土事業第 1 期が起工され，良質な粘土を大量に客入することが可能となり，改良が飛躍的に進むこととなった．昭和 30 年代半ばからはダンプトラックによる客土も行われるようになり，昭和 40 年代半ばからトラック客土が主流となった．現在は客土用の良質な粘土が不足気味で，富岡や八幡丘近辺の火山灰質粘土が用いられている．

富良野土地改良区史（1975）の年表によると，戦後昭和 21 年から 37 年までを軌道客土・国営灌排期としており，昭和 38 年以降を圃場整備期としている．昭和 41 年に道営圃場整備事業富原地区が着工され，その後，各地区で圃場整備事業の期成会が設立され整備が進んだ．中富良野町では昭和 46 年に中富良野南地区，48 年宇文地区，西地区，49 年中央地区などが始まっている．平成 21 年からは道営圃場整備事業にかかわって国営農地再編整備事業富良野盆地地区（上原ら，2008）が始まり，当初計画では，受益面積が約 2,200ha で，農地造成や区画整理などが行われ，平成 27 年完了を目指して施工が行われている．具体的には，農業用大型機械の導入と作業性の向上により生産性を高めることを目的とする小さな区画の水田の集約・大区画化，地下灌漑システムの導入により乾燥害のリスク低減を図る，また，土壌水分管理の簡素化により農作業の効率化を図ることを目的とした用排水の整備，収穫作業等の車両運搬効率の向上を図るための農道整備，客土などが行われる．道営事業についても国営事業と一体に，経営体育成基盤事業などにおいて，道単独の農家負担軽減対策いわゆるポストパワーアップ事業などが引き続き実施される予定である．

## (ii) 農業データ

まず，国内における動向についてまとめる（農林水産省，2005，2010a，

2010b). 主食としての米の消費量の漸減により昭和 45 年から減反政策が始まり、さらに昭和 62 年には生産者米価が引き下げられた。一方、国際的な観点から見ると、1995 年（平成 7 年）のウルグアイラウンド農業合意において農産物（米）の輸入自由化問題が始まり、WTO の加盟によって安価な海外農産物が輸入されるようになった。こうした情勢を踏まえ、国においてはそれまでの食糧管理法（食管法）を改正して、平成 16 年「主要食糧の需給及び価格の安定に関する法律」（食糧法）を定め減反政策の廃止など、生産者の競争力をつけるための対策を講じてきた。一方、国内農家の生き残り策として考えられたことは、『安全』・『安心』をテーマとした付加価値の高い農産物の生産（ブランド化）や産直など流通・販売システムの見直し或いは生産規模の拡大による価格の低減などである。農林水産省、地方自治体ではこれらの問題に危機感をもって様々な対策を講じている。たとえば高齢化や後継者不足を解消し経営規模を拡大するため新規就農者を含めた集落営農の組織化や法人化の促進、食糧生産面積の減少に歯止めをかけるため耕作放棄地再生利用対策の実施、定住支援や地域産業との連携を図る農山漁村活力再生・支援事業の実施、ハード面でこれらの施策を支える担い手育成事業などである。

中富良野町における農業関係データを表 2-4～8 に示す。各データは平成 12 年から 21 年のものである（中富良野町産業建設課，2005，2010）。表 2-4 から、平成 21 年の総人口は平成 12 年に比べ 312 人減少しており、5.4%の減少である。しかしながら総世帯数は 203 戸増えており、核家族化が進行していることがうかがえる。農家戸数は 210 戸減少しており、総世帯数の動向と大きく乖離している。中富良野町において昭和 63 年に減農薬・有機栽培モデル稲作集団が設立され、平成 5 年には中富良野町クリーン米生産協議会が 223 戸の農家によって設立、運営された。以後、平成 12 年には『YES! Clean 北の農産物表示制度』の認証を北海道クリーン農業推進協議会から受けている。また、表 2-5 で示したように、一戸当たりの耕地面積が増えている。特に、10ha 以上の所有者が 2.2 倍に増えており、この 10 年で生産規模が大きく拡大されている。これは離農跡地の買い増しなどによるものであるが、優良農地を遊休化、耕作放棄化させないことにも繋がっている。平成 12 年では一戸当たり 10ha 以上の規模の農家は全体の 20.1%であるのに対し、10年後の平成 21 年には 43.7%になっている。3ha 未満の規模の農家が 3%弱の減少であることから、3～10ha 規模の農家が極端に減少している。これは、小規模での営農が非常に厳しいことを示している。

表 2-7 は主要農作物作付状況の推移である。作付面積はこの 10 年で 356ha 減少した。主要農作物の内、畑作物については秋まき小麦と玉ねぎ

が大幅に増え，人参が減っている．その他の作物は増減幅が小さい．水稻作付面積は平成 12 年から 375ha 減少し，また，作付面積全体の内，水稻作付けが占める割合は平成 12 年に比べ 41.8% から 35.0% に減っている．

表 2-8 は農業産出額の推移である．平成 11 年以降の中富良野町の農業産出額は 64～70 億円で，それ以前に比べ 10 億円近く減少している．野菜や麦類が増加してはいるが，米の産出額が大幅に減少していること，一戸当たりの算出額が増えても総農家数が大幅に減少しているため総産出額は減っているためである．しかし，生産規模拡大によって一戸当たりの産出額は増加している．

### (iii) 圃場排水

一般に必要な以上の水が圃場内に存在すると収量低下や根腐れなどの問題を引き起こす．前述したように，富良野盆地地区はかつて富良野湖と呼ばれる低湿地帯の名残で泥炭土壌であり，圃場の水はけは他地区の一般的な圃場に比べて悪い．泥炭土壌中の水分を排除することで泥炭層の収縮を促進し，地耐力を増大させるとともにかんがい期の田面浮上現象を防止する．

土壌中の水を除去するには明渠の排水路と圃場に設置する地中管からなる暗渠排水が用いられる．トレンチャーと呼ばれる農業機械を用いて 1 m ほどの深さの溝を圃場に掘り，直径 6 cm 程度の素焼きの土管やプラスチック系コルゲート管などの透水管を地中管として溝に設置する（写真 2-3，2-4）．その上に疎水材として籾殻，ウッドチップなどを入れ，土で埋め戻す（写真 2-5，2-6）．地中管は不透水性もしくは半透水性で直径 9 cm 程度の集水管に集められる．集水管出口には弁の機能を果たす水閘が設置されており，開閉により集水管内の水の排出を制御できる．集水管に集められた水は水閘を通して付帯する明渠の排水路に排出される．

地中管の平面的な配置は 10m 程度の間隔で行われるが，速やかな地表水排除が要求される場合は，設置間隔を狭め排水効果を高める．また，泥炭土水田においては，暗渠直上の沈下によって田面の凹凸が発生するが，間隔を狭めることで沈下量が減少し田面の均平精度の向上につながる．

[illegible]

### 博覽館十景各賦四

表 2-1 土地改良区の賦課面積

地域名		草分	東中	平原	扇山	東郷	合計 ha
賦 課 面 積	水 田	928	1,289	3,258	476	165	6,112
	(研究対象)	(628)	(745)	(3,258)	0	0	(4,631)
	畑	0	0	0	0	1,802	1,802
	合 計	928	1,289	3,258	476	1,967	7,914



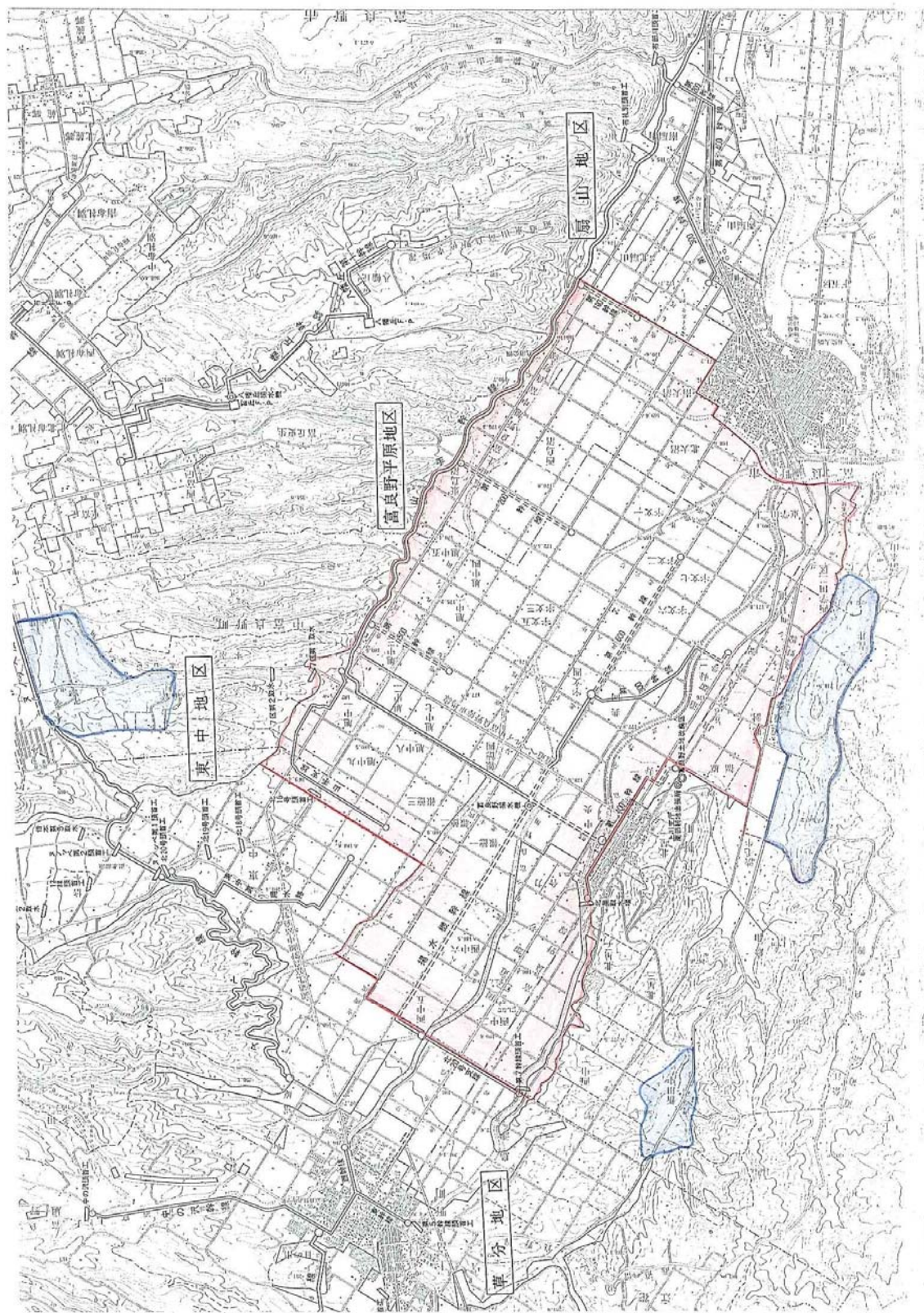


图 2-2 研究对象地域位置图



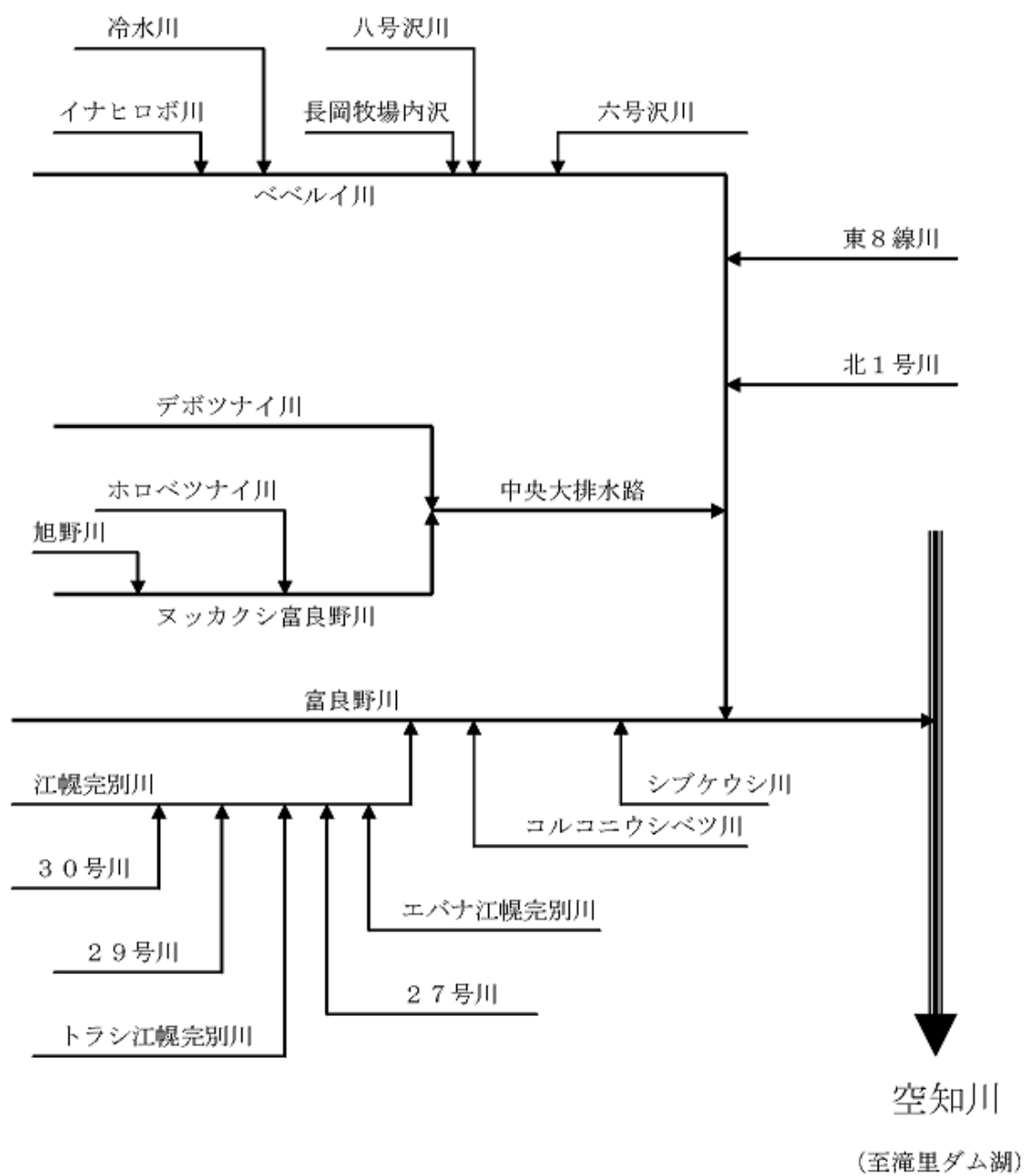


図 2-3 富良野盆地内の水系

表 2-2 土壌区分と面積

土壌統名	面 積 ha
中富良野 統	2461
東 中 統	548
寿 統	521
富 原 統	446
デボツナイ統	348
島 津 統	258
共 同 統	179
合 計	4761

表 2-3 水田土壌区分一覧表

土壌 統名	土壌 区名	記 号	分布町村，面積(ha)			腐植層	礫	酸化 沈殿物
			上富 良野	中富 良野	合 計			
中富 良野	中富 良野	Na	193	2,268	2,461	全層 多腐植	なし	あり
島 津	島 津	Shi	165	93	258	表層 多腐植	40cm 以下	あり
共 同	共 同	Kyo	0	179	179	表層 多腐植	なし	あり
デボツ ナイ	デボツ ナイ	De	268	80	348	表層 多腐植	40cm 以下	あり
寿	寿	Ko	38	483	521	表層 多腐植	なし	あり
富 原	富 原	To	390	56	446	表層 多腐植	30cm 以下	あり
東 中	東 中	HiG	410	138	548	表層 多腐植	50cm 以下	なし

土壌 統名	土性		泥炭	黒泥	グライ	堆積様式	母 材
	表土	次層					
中富 良野	壤質	—	20cm 以内	なし	全層	集積	ヨシ
島 津	壤質	—	あり	40cm 以内	全層	集積 水積	ヨシ 非固結
共 同	粘質	強粘 質	50cm 以下	なし	50cm 以下	水積 (河成)	非固結 水成岩
デボツ ナイ	壤質	壤質	なし	なし	40cm 以下	水積 (河成)	非固結 水成岩
寿	粘質	壤質	なし	なし	50cm 以下	水積 (河成)	非固結 水成岩
富 原	壤質	壤質	なし	なし	なし	扇状 堆積	非固結 水成岩
東 中	壤質	壤質	なし	なし	なし	水積 (河成)	非固結 水成岩

※ 北海道立中央農業試験場(1975) 土壌生産性分級図並に土壌区分図より必要項目抜粋







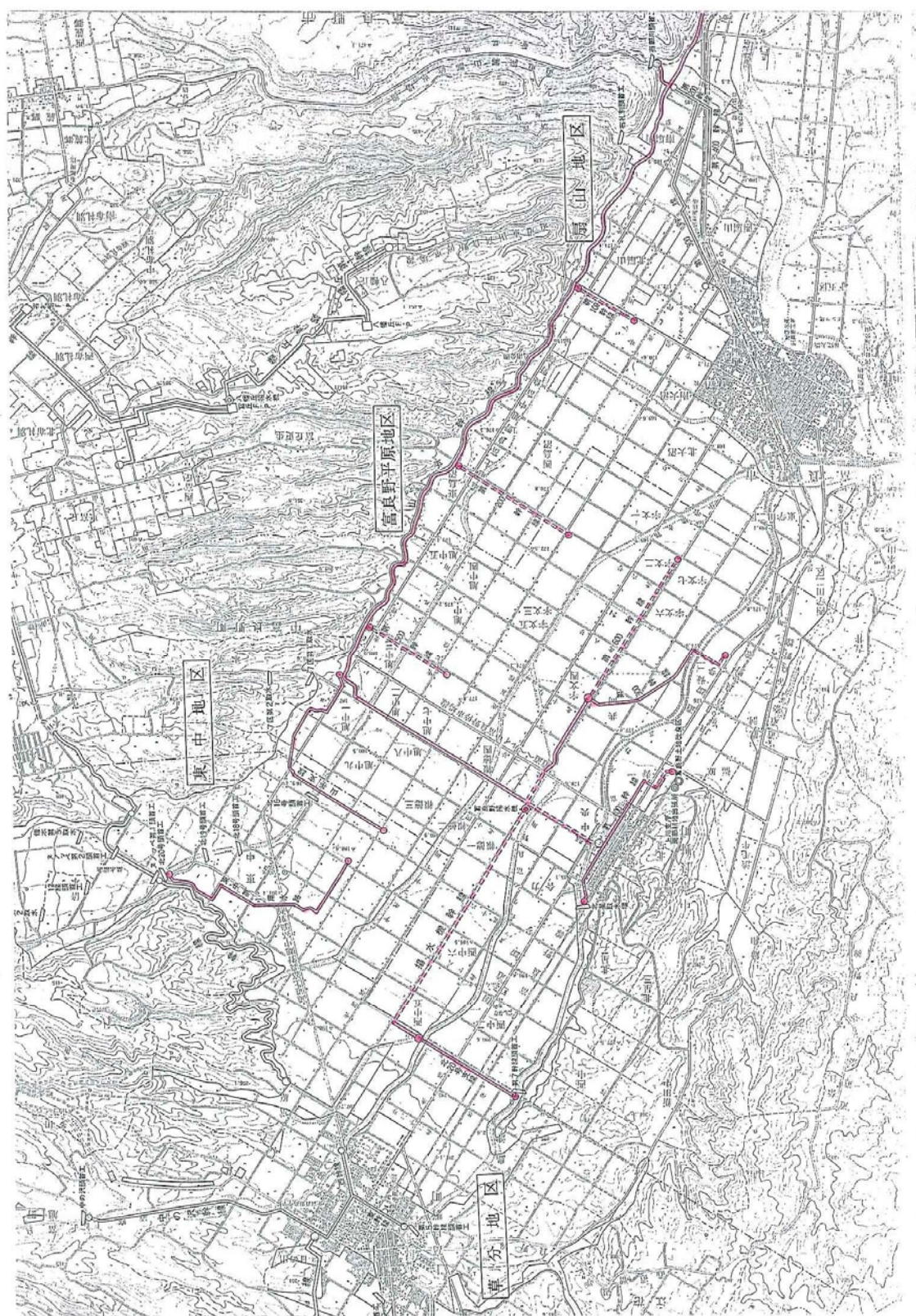


图 2-6 用水路位置图





写真 2-1 馬般客土の様子



写真 2-2 軌道客土

表 2-4 中富良野町の人口と農業戸数の推移

年度 項目	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21
総人口	5,912	5,896	5,939	5,906	5,769	5,784	5,753	5,753	5,655	5,594
総世帯数	1,953	1,983	2,037	2,056	2,055	2,081	2,084	2,084	2,123	2,156
農業戸数	609	604	582	557	537	519	487	454	402	309

表 2-5 規模別農家数

年度 項目	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21
総農家数	609	604	582	557	537	519	487	454	402	399
1ha 未満	32	41	44	34	45	48	47	52	16	25
3ha 未満	65	67	59	58	49	43	38	37	31	27
5ha 未満	125	125	117	110	99	89	82	73	69	64
7.5ha 未満	157	141	132	127	115	109	88	66	62	61
10ha 未満	101	97	89	90	87	78	61	60	54	48
15ha 未満	83	84	88	79	78	83	83	77	80	82
15ha 以上	44	49	53	59	64	88	88	89	90	92

表 2-6 規模割合対比

年度 項目	平成 12 年度		平成 21 年度	
	総農家数 609	規模割合 (%)	総農家数 399	規模割合 (%)
1ha 未満	32	6.1	25	6.3
3ha 未満	65	9.7	27	6.8
5ha 未満	127	20.9	64	16.0
7.5ha 未満	157	26.3	61	15.3
10ha 未満	101	16.8	48	12.0
15ha 未満	83	13.7	82	20.6
15ha 以上	44	6.5	92	23.0



表 2-7 主要農作物作付状況の推移 (ha)

年度 項目	H 12	H 13	H 14	H 15	H 16	H 17	H 18	H 19	H 20	H 21
水稲	1,584	1,473	1,478	1,457	1,500	1,458	1,213	1,217	1,204	1,209
〃 加工	71	81	63	63	34	0	0	0	0	0
秋小麦	395	404	387	437	422	496	531	530	534	539
大豆	108	173	177	160	111	161	237	167	140	120
小豆	127	100	74	63	87	66	42	36	34	30
馬鈴薯	120	130	123	111	106	112	111	117	113	119
甜菜	176	158	182	194	197	192	192	206	191	180
人参	338	287	234	229	206	162	140	146	129	116
玉ねぎ	534	516	505	449	475	538	598	672	672	679
南瓜	172	142	155	163	177	161	160	154	154	156
コーン	44	51	53	52	66	68	86	122	122	180
アスパラ	39	36	38	40	41	44	49	53	53	54
メロン	89	82	80	81	79	70	69	66	66	62
スイカ	11	11	10	8	6	6	6	7	7	8

※ コーンはスイートコーン、アスパラはグリーンアスパラ。

表 2-8 年次別農業産出額の推移

(単位：千万円)

項目 年度	産出額	耕 種					総農家 数	一戸当 たり産 出額
		米	麦類	豆類	いも類	野菜		
H 6	802	339	13	20	22	408	—	—
H 7	747	292	12	20	23	400	—	—
H 8	764	276	17	20	21	430	—	—
H 9	739	242	16	15	19	373	—	—
H 10	744	232	26	20	19	447	—	—
H 11	709	223	21	15	21	429	636	1.11
H 12	676	215	29	16	20	419	609	1.11
H 13	658	200	26	16	20	396	604	1.09
H 14	643	173	33	17	17	404	582	1.10
H 15	663	157	45	24	17	420	557	1.19
H 16	635	136	36	19	18	426	537	1.18
H 17	637	147	41	17	25	407	519	1.23
H 18	706	132	42	18	24	490	487	1.45
平 均	666	173	34	18	20	424	566	1.18

※ 平成 6 年から 11 年までの総農家数が不明のため一戸当たりの産出額も不明。

※ 産出額には果実，花卉，工芸種苗他並びに畜産の産出額を含まない。

※ 総農家数には上記果実等の生産者が概ね 30 戸程度含まれているため，その戸数を差し引くと一戸当たり算出額は数％上がる（果実等の専業の生産者数は明確なデータが無い）。

※ 平均値はデータがある平成 11 年から 18 年までのものを用いた。



写真 2-3 排水路と地中管出口



写真 2-4 地中管





写真 2-5 疎水材（ウッドチップ）



写真 2-6 暗渠工事（埋め戻し前）

### 第 3 章 富良野盆地地区の土壌特性

#### 1. 緒言

本章では丘陵部に位置する畑地圃場の作土層に関する基礎的データの収集を目的として、水分と強熱減量の関係、イオン吸着量と土壌粒径の関係について実験的に検討した。さらに、富良野盆地南部の平坦部に位置する畑地圃場の土壌におよぼす十勝岳泥流の影響を検討するため、富良野盆地南部を東西方向に横断する形で圃場から土壌を採取し、その土壌の pH(H<sub>2</sub>O)、強熱減量、硫酸イオン含有量を測定した。なお、各測定値の意味および従来標記値への換算方法については既報文(北海道立中央農業試験場, 1992)を参照されたい。

#### 2. 土壌水分と強熱減量の関係

##### 2.1 調査方法

土壌は平坦部である共同地区(共同統)、宇文地区(中富良野統)、鳥沼地区(中富良野統、島津統)と、丘陵部である中富良野町新田中地区(分類なし、新田統に隣接)、本幸地区(安井統)、同鹿討地区(分類なし、上富良野統に隣接)、同吉井地区(上富良野統)の圃場で採取した。サンプリングポイントは対角法で決定し、5点とした。図 3.2-1 に示すように各ポイントで深さ 0.00–0.45 m の土壌約 1 kg を試料として採取した。土壌採取後は土層が逆転しないように注意しながら埋め戻しを行った。各採取地点で採取した土壌を日陰で 2 日間乾燥させた。その後、採取 5 地点の風乾土壌を等量ずつ混合し、JIS 標準篩を用いて乾式篩い分けを行った。採取した土壌から、試料土壌 5g を 0.01g まで正確に計り取り、質量既知のルツボに入れた。これを乾燥機(ISUZU 製)に入れ、110℃で 24 時間加熱することにより水を蒸発させた。デシケータ内で約 30 分放冷した後、ルツボごと質量を測定し、湿潤土壌 100g に含まれている水分[g/100g-wet soil]を算出した。続いて、先ほど乾燥させた土壌をルツボごとマッフル炉(Yamato, FM27)に入れ、700℃で 5 時間加熱した。加熱後、マッフル炉の電源を切り、マッフル炉内で常温付近まで放冷した後、土壌入りルツボをデシケータに移して 1 時間以上除湿した。土壌入りルツボの質量を測定し、乾燥土壌 100g に含まれている強熱減量[g/100g-dry soil]を算出した。

##### 2.2 調査結果及び考察

###### 2.2.1 土壌中の強熱減量

土壌に含まれている強熱減量の範囲を調べるため、平坦部の

A,B,C 層，丘陵部の A,B,C 層の強熱減量データを個別に検討した．一例として図 3.2-2 に 2003 年秋期に採取した丘陵部 A 層における強熱減量値の出現確率を示す．データは概ね 1 本の直線で近似できそうである．この図で直線になった場合，データの出現確率が正規分布に近似できることを示している．この図から 5%，95%に相当する強熱減量の値を求め，丘陵部 A 層における強熱減量の出現範囲とした．同様の手順で他のデータも整理し，求めた範囲を表 3.2-1 に示した．丘陵部では深さに関係なく強熱減量はほぼ同じ範囲となった．一方，平坦部は深くなるにつれ強熱減量が多くなる傾向にあることがわかった．実際に土壌採取のために掘った際，平坦部では 0.30 m 以上掘ると木片等とともに泥炭が出現した．平坦部土壌の強熱減量には堆肥に由来する有機物以外に泥炭などに由来する有機物が含まれているものと考えられる．なお，丘陵部では 0.40-0.50 m 程度まで掘るとスコップではなかなか掘り進めない岩盤層が出現した．岩盤層から有機物が供給されることは考えにくいため，丘陵部における強熱減量はほとんどが堆肥に由来するものであると予想される．

以上の結果から，丘陵部における強熱減量の深さ方向分布はほとんど無いように思われる．一方，平坦部については A,B,C 各層で強熱減量の値が異なるように見受けられる．そこで，調査データ全てを統計学的解析手法である平均値検定(外島，1975)で検定した．その計算結果を表 3.2-2 に示す．データから計算した  $t$  値と文献の  $t$  表(外島，1975)から読み取った値を比較して，計算値が大きい場合は「有意差あり」と判断され，計算値が小さい場合は「有意差なし」と判断される．今回は 5%有意差の有無を確認する．検定数は 58-80 となるが，文献の  $t$  表には 40 個で 2.021，60 個で 2.000， $\infty$ で 1.960 と記載されており， $t$  値は検定数が 40 個以上になるとほとんど変化しなくなる．そこで，比較に用いる  $t$  値は検定数の範囲内である 60 個の値( $t = 2.000$ )とした．表 3.2-2 に示したように平均値検定を行った結果，丘陵部では A,B,C 層の間に有意差はなかった．即ち，丘陵部における強熱減量の深さ方向分布はないと判断できる．一方，平坦部では全ての検定で有意差ありと判定されたことから，平坦部における強熱減量には深さ方向分布があると判断される．また，同一層で地形差を検定してみたところ，全て有意差ありとなったことから，丘陵部と平坦部では同一の深さでも土壌に含まれている強熱減量に違いがあることが分かった．これは，平坦部の土壌が泥炭の影響を受けていることを裏付けているとともに，表層近くの A 層も泥炭の影響を受けていることを示している．

図 3.2-3 に 2003 年春，夏，秋に調査した土壌の水分[g/100g-wet soil]と強熱減量[g/100g-dry soil]の関係を示す．データは約 500 あり，プロットにはバラツキがあるものの両者の関係は上に凸の曲線で表され，特に強熱減量が少ない範囲ではほぼ直線になることがわかった．プロットがバラついた主な理由として降雨や散水の影響が考えられる．また，夏期の土壌採取は気温 30℃ 以上，快晴の条件であったため，A 層は乾燥しておりスコップを差し込んだ時にあまり抵抗を感じなかった．しかし，掘り進んで B,C 層まで行くと，見た目でも湿潤状態になっており，スコップを差し込む時に若干の抵抗を感じた．季節・天候に関わらず降雨数日後あたりでは A 層の水分が少なくなりやすいものの，B,C 層の水分は大きく変化しにくいようである．一般に等球をランダム疎充填した場合の充填率は体積分率で 0.6 程度である(化学工学会，1988)といわれていることから，空隙率は 0.4 程度と考える．粒径の揃った無機質の砂を容器に入れ，その空隙が全て水で満たされている場合を仮定して空隙による最大水分量を試算する．砂の見かけ充填量を  $1 \text{ m}^3$  とすると，砂の平均的な密度は  $2600 \text{ kg/m}^3$  程度，水の密度は  $1000 \text{ kg/m}^3$  であるため，

$$(\text{砂の質量}) = (0.6 \text{ m}^3)(2600 \text{ kg/m}^3) = 1560 \text{ kg}$$

$$(\text{水の質量}) = (0.4 \text{ m}^3)(1000 \text{ kg/m}^3) = 400 \text{ kg}$$

となる．湿潤土壌基準の水分量を計算すると，

$$(\text{水分量}) = (400)/\{(1560) + (400)\} \times (100) = 20.4 \text{ g/100g-wet soil}$$

となる．等球ではなく粒径分布がある粒子群の場合は，大粒子が形成する空隙に小粒子が入り込むため空隙が減少し，保持できる水分は計算値よりも小さくなる．そのため，等球粒子間の空隙によって保持される水分の最大値が 20g/100g-wet soil 程度であると考えられる．この値を図 3.2-3 中に破線で示した．ほとんどのプロットが破線よりも上にあることから，土壌の保水量は強熱減量成分の影響を受けていることがわかった．土壌中の強熱減量成分は主に有機物であり，その多くは春期に施す堆肥に由来していると考えられる．堆肥を施すことにより土壌の保水性が増すことが確認された．

### 3. 栄養塩吸着量におよぼす粒径の影響

#### 3.1 調査方法

土壌試料を採取した試験圃場は中富良野町新田中地区に位置し，土壌採取時(2005 年夏)の栽培作物は玉ねぎである．図 3.3-1 に調査圃場の概略図を示す．圃場の分類は地力保全基本調査成績書(北海道中央農業試験場，1978)には記載されていないが，新田統に隣接する丘陵部である．丘陵部の圃場には畦等が存在しないため明確な

境界がない．そこで，玉ねぎ栽培を予定していた範囲(太線および一点鎖線で囲まれた 80×40 m)を対象圃場とした．対象圃場の各辺には平均で 0-14%の勾配があり，図左上から左右方向に向かって下がる傾斜となっている．サンプリングポイントは対角法で決定し，○で示す 5 点とした．表面から 0.30 m までは特に問題なく掘ることができたがそれよりも深くなると土壌が非常に硬く掘ることができなかったことから，図 3.3-2 に示すように各ポイントで深さ 0.15-0.30 m の土壌約 1 kg を試料として採取した．土壌採取後は土層が逆転しないように注意しながら埋め戻しを行った．各採取地点で採取した土壌を日陰で 2 日間乾燥させた．その後，採取 5 地点の風乾土壌を等量ずつ混合し，JIS 標準篩を用いて乾式篩い分けを行った．また，土壌試料をイオン交換水に懸濁させ，JIS 標準篩と保留粒子径 3  $\mu\text{m}$  の定量濾紙(No.6, アドバンテック製)，メンブレンホルダー(KG-47, アドバンテック製)，循環式アスピレーター(A-3S, Iuchi 製)を用いて湿式篩い分けを行った．分級した土壌質量を測定するため，恒温乾燥器(NDO-400, EYELA 製)と電子天秤(Shimadzu 製, LIBROR EB-500, 最小読取質量 10 mg)を使用した．さらにイオン交換水に懸濁させた土壌試料の粒径分布をレーザー回折・散乱式粒度分布測定装置(MT3000EX, 日機装製)で測定した．乾式篩い分けをした土壌試料は粒径ごとに土質試験方法(土質工学会, 1983)および土壌分析方法(日本土壌協会, 2002)に準じて前処理し，分析した．pH(H<sub>2</sub>O)の測定には pH 計(PH5011A, CUSTOM 製)，EC の測定には導電率計(CD5021A, CUSTOM 製)，水分の測定にはドライオーブン(ANS-1125, ISUZU 製)，強熱減量の測定にはマッフル炉(FM27, YAMATO 製)を用いた．質量測定には精密電子天秤(GR-300, 最小読取質量 0.1 mg, エー・アンド・ディ製)を用いた．カリウムイオン濃度，マグネシウムイオン濃度は偏光ゼーマン原子吸光光度計(Z-8200, 日立製作所製)で測定した．原子吸光光度計の検量線を作成のため，カリウムイオン標準溶液(和光純薬工業製)，マグネシウムイオン標準溶液(和光純薬工業製)をイオン交換水で希釈した水溶液を使用した．

硝酸イオン含有量，硫酸イオン含有量は次の方法で測定した．試料土壌 10 g と水 50 g を混合し，それを遠心分離(3000 rpm, 15 分)した上澄み液を得た．この上澄み液中の硝酸イオン濃度，硫酸イオン濃度は高速液体クロマトグラフィーで測定した．硝酸イオン濃度および硫酸イオン濃度の測定には，イオンクロマトグラフ用高性能充てんカラム(Shim-pack, IC-A1)を装着した高速液体クロマトグラフィーHIC-6A(島津製作所製)を用いた．溶離液としてフタル酸(特



級、和光純薬工業製)とトリス(ヒドロキシメチル)アミノメタン(特級、和光純薬工業製)の混合溶液を用い、濃度はそれぞれ  $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ 、 $2.4 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$  とした。カラムオープン温度は  $313 \text{ K}$ 、溶離液流量は  $1.5 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$  とした。検出器には電気伝導度検出器 (CDD-6A, 島津製作所製)を用いた。イオンクロマトグラフィーの検量線を作成するため、硝酸カリウム(特級、関東化学製)と硫酸ナトリウム(無水物、特級、関東化学製)とイオン交換水を用いて、硝酸イオン-硫酸イオン混合標準原液を調製した。混合標準原液をイオン交換水で希釈し、複数濃度の混合標準溶液を調製した。混合標準溶液を高速液体クロマトグラフィーで分析し、得られた吸光度やピーク面積と混合標準溶液に含まれている各イオン濃度から検量線を作成した。前述の方法で得た上澄み液を高速液体クロマトグラフィーで分析し、検量線から各イオンの濃度を求めた。測定した上澄み液中の各イオンの濃度は次式を用いて乾燥土壌  $100 \text{ g}$  あたりの吸着量に換算した。

$$C = a \frac{100W + SM}{S(100 - M)} \quad (3-1)$$

ここで、 $C$  は乾燥土壌  $100 \text{ g}$  あたりの吸着量 [ $\text{mg} \cdot 100 \text{ g-dry soil}^{-1}$ ]、 $a$  は各イオン濃度の測定値 [ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]、 $S$  は試料土壌質量 [ $\text{g}$ ]、 $W$  は水添加量 [ $\text{g}$ ]、 $M$  は土壌水分 [ $\text{g-water} \cdot 100 \text{ g-wet soil}^{-1}$ ]である。

また、強熱減量と腐植量の関係を検討するため、中富良野町本幸地区(安井統)、同鹿討地区(分類なし、上富良野統に隣接)、同吉井地区(上富良野統)の圃場でも土壌を採取した。

## 2.2 調査結果と考察

### 2.2.1 粒径分布

土壌試料を乾式篩い分けした場合、イオン交換水に懸濁させてレーザー回折・散乱法で測定した場合の粒径分布を図 3.3-3 に示す。乾式篩い分けを行った場合、土壌試料は粒径  $1.000 \text{ mm}$  以下の粒子が  $80\%$ 以上となっている。粒径  $2.360 \text{ mm}$  以上および  $0.075 \text{ mm}$  以下の粒子は検出されなかった。試料土壌の  $10\%$ 径、 $50\%$ 径、 $90\%$ 径はそれぞれ  $0.18 \text{ mm}$ 、 $0.52 \text{ mm}$ 、 $1.2 \text{ mm}$ であった。一方、湿式篩い分けした場合、 $1.000 \text{ mm}$  以下の粒子が  $99\%$ 以上となっている。粒径が  $2.360 \text{ mm}$  以上の粒子、公称径  $3 \mu\text{m}$  以下の粒子は検出されなかった。試料土壌の  $10\%$ 径、 $50\%$ 径、 $90\%$ 径はそれぞれ  $0.07 \text{ mm}$ 、 $0.21 \text{ mm}$ 、 $0.48 \text{ mm}$ であった。湿式篩い分け法で処理した場合、乾式篩い分け法の場合と同様、 $2.360 \text{ mm}$  以上の粒子は確認されなかった。しかし、乾式篩い分けでは確認されなかった  $0.075 \text{ mm}$  以下の粒子が検出された。乾式篩い分けの場合と湿式篩い分けの場合を比較する

と、土壌粒径は 2-3 倍異なる値である。土壌粒子は複数粒子が凝集した団粒化構造をとる。乾式篩い分けでは団粒化構造を維持した粒径を測定しており、湿式篩い分けでは構成粒子の粒径を測定したものと考えられる。一方、レーザー回折・散乱法で測定した粒径分布は 0.005-2.000 mm であり、湿式篩い分けを行った場合の粒径範囲とほぼ同じになった。10%径、50%径、90%径はそれぞれ 0.026 mm, 0.16 mm, 0.53 mm であった。しかし、湿式篩い分けの場合と比較すると、およそ 0.25 mm 未満の範囲で粒径分布が異なる。レーザー回折・散乱法の場合、測定値は粒子形状の影響を受ける。そのため、0.25 mm 未満の粒子はそれ以外のサイズの粒子と形状が異なっていると推測される。湿式篩い分けを行うと粒子に吸着しているイオン類がイオン交換水中に溶解してしまうため測定できない。そのため、以降の各測定項目に対する粒径の影響は乾式篩い分けで分級した粒子で検討を進める。

#### 2.2.2 pH(H<sub>2</sub>O)

図 3.3-4 に pH(H<sub>2</sub>O)と粒径の関係を示す。土壌粒子の代表粒径は篩目の幾何平均とした。pH(H<sub>2</sub>O)は 5.8-6.0 の範囲であり、粒径が小さくなると pH(H<sub>2</sub>O)はわずかであるが上昇する傾向にある。粒径 2.360-2.000 mm の土壌試料と粒径 0.125-0.075 mm の土壌試料の pH(H<sub>2</sub>O)を比較すると、粒径 0.125-0.075 mm の土壌試料の方が 0.2 大きい。しかし、本研究で用いた pH 計の測定精度は±0.1 である。この差は pH 計の測定誤差の範囲内と解釈することも可能である。一方で、土壌は緩衝効果を持っていると考えられる。このことから、本研究で用いた土壌試料の pH(H<sub>2</sub>O)に対する粒径依存性はほとんどないとみなした。

#### 2.2.3 EC

図 3.3-5 に EC と粒径の関係を示す。pH(H<sub>2</sub>O)の場合と同様、代表粒径は篩目の幾何平均とした。粒径 0.250 mm 以上では EC の値がほぼ同じであった。しかし、粒径が 0.250 mm 未満になると EC の値が大きくなった。粒径 2.360-2.000 mm の試料と粒径 0.125-0.075 mm の試料を比較すると約 2.3 倍の違いがある。EC は電解質量に比例すると推測できることから、この結果は、粒径が 0.250 mm 未満の小粒子が電解質を多く吸着していることを示している。

#### 2.2.4 強熱減量

図 3.3-6 に強熱減量と篩目の幾何平均粒径の関係を示す。粒径 0.250 mm 以上の土壌試料は、強熱減量の値がほぼ同じであった。一方、粒径が 0.250 mm 未満の土壌試料は、強熱減量の値が大きくなった。このことから、小粒子には強熱減量の成分が多く含まれて

いることがわかった．この傾向は前述した EC の粒径依存性と同じ傾向である．粒径が 0.250 mm 未満の土壤粒子が電解質を多く吸着しているのは，強熱減量成分の含有量が関与していると考えられる．強熱減量と腐植量は測定方法が違いため，異なる意味をもつ量である．土壤中の有機化合物などの量を測定するには土壤分析法(日本土壤協会，2002)に従って腐植量を測定する必要がある．しかし，腐植量の測定には数種の試薬やガラス器具を使用し，熟練を要する．一方，土質試験方法(土質工学会，1983)に基づく強熱減量は比較的容易に測定できる．強熱減量と腐植量に何らかの関係が認められれば，強熱減量の測定により腐植量の推定が可能となる．これにより，土壤中の腐植量を土壤分析法(日本土壤協会，2002)に従って正式に測定する際の目安にもなる．図 3.3-7 に強熱減量と腐植量の関係を示す．図中破線は強熱減量と腐植量が同量の場合を示す．多少ばらつきがあるが，強熱減量と腐植量の間には比例関係が認められた．データは同量を表す破線で示した対角線よりも上にある．土質試験方法(土質工学会，1983)に従って測定した強熱減量は土壤分析法(日本土壤協会，2002)に従って測定した腐植量よりも 1.7 倍程度大きい値となった．このことから，強熱減量を測定することで腐植量を推定できると考えられる．今回，強熱減量として測定された物質は多くが堆肥などに由来する腐植であると考えられる．しかし，施された自家製堆肥等は目視確認ではあるが 1 mm 前後のものが多く，0.1 mm 程度のものは少なかった．そのため，施された堆肥等が土壤微生物等によって分解され，細かくなった成分が電解質の吸着に関与していると推測される．

#### 2.2.5 陽イオンおよび陰イオン

図 3.3-8 に陽イオン吸着量と粒径の関係を示す．1 価の陽イオンであるカリウムイオンの場合，粒径 0.250 mm 以上では土壤粒径に関係なくカリウムイオン吸着量は  $63 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g-dry soil}^{-1}$  程度では一定であった．粒径が 0.250 mm 未満の場合，粒径が小さくなるとカリウムイオン吸着量が大きくなる傾向が見られる．粒径 2.360–2.000 mm の土壤試料と粒径 0.125–0.075 mm の土壤試料を比較すると約 1.2 倍の違いがある．一方，2 価の陽イオンであるマグネシウムイオンについてもカリウムイオンと同様の傾向が見られた．マグネシウムイオン吸着量は，粒径 2.360–2.000 mm と粒径 0.125–0.075 mm の土壤試料を比較すると約 1.4 倍の違いがあった．イオン吸着量の絶対値は施肥量などの影響を受けるため議論が難しいが，両イオンとも小粒子に多く吸着する傾向が認められた．

図 3.3-9 に陰イオン吸着量と粒径の関係を示す．2 価の陰イオン

である硫酸イオンは，粒径 0.250 mm 以上で吸着量の値はほぼ同じであった．粒径 0.250 mm 未満の小粒子ではカリウムイオン吸着量が多くなり約 2.3 倍であった．1 価の陰イオンである硝酸イオンについても同様な傾向が見られ，粒径が 0.250 mm 未満の粒子とそれ以上の粒子では吸着量が約 3.4 倍異なった．陽イオンの場合と同様，陰イオン吸着量の絶対値は施肥量の影響を受けると予想されるため，今回のデータのみでの議論は難しい．しかし，陽イオンの場合と同様，陰イオン吸着量にも粒径依存性が確認された．陽イオンおよび陰イオンの両結果と合わせて考えると，陽イオンよりも陰イオンの方が吸着量の粒径依存性が大きいことがわかった．陰イオンの場合，イオン価数が異なると陽イオンの場合と傾向が逆になる理由については現在検討中であるが，土壌を採取した圃場に施された堆肥等に由来する強熱減量成分が優れた陰イオンの吸着能力を持っており，強熱減量成分の陽イオン吸着座と陰イオン吸着座の性質や単位質量あたりの吸着座数が異なっていたことなどが挙げられる．

#### 4. 富良野盆地南部の平地圃場の硫酸塩分布

##### 4.1 調査方法

試験圃場は富良野盆地南部に位置する宇文地区(圃場①：東 2 線北 6 号)，西鳥沼地区(圃場②：東 5 線北 8 号，圃場③：東 7 線北 7 号)，東鳥沼地区(圃場④：東 9 線北 8 号)の 4 圃場である．**図 3.4-1**に試験圃場の位置を示す．図の横軸は東基線を 0，東 10 線を 10 としている．同図中には富良野盆地を流れる主要河川の位置と地力保全基本調査成績書(北海道中央農業試験場，1978)による土壌区分も示した．土壌採取は 2010 年 8-10 月に行った．圃場①では深さ 0.3-1.0 m の土壌を深さ別に，圃場②，③，④では深さ 0.50 m 付近の土壌を約 500 g ずつ採取した．pH(H<sub>2</sub>O)，水分，強熱減量，硫酸イオン含有量の測定方法は前節と同様である．

##### 4.2 調査結果と考察

###### 4.2.1 深さ方向分布

**図 3.4-2**に圃場①で採取した土壌の pH(H<sub>2</sub>O)，強熱減量，硫酸イオン含有量の深さ方向分布を示す．pH(H<sub>2</sub>O)は深さ 0.3-0.4 m で 4.9 であった．深くなるほど pH(H<sub>2</sub>O)は小さい値となり，深さ 1.0 m で 3.0 であった．硫酸イオン含有量は深くなるほど多くなり，深さ 0.50 m 以下では約 3 g/100g-dry soil でほぼ一定とみなせる．この多量の硫酸イオンは十勝岳泥流の影響と考えられる．水野ら(1992)が報告しているように，pH(H<sub>2</sub>O)と硫酸イオン含有量は反比例の関係にある．強熱減量はばらつきが大きいものの，深さ 0.3-1.0 m すべてで

60 g/100g-dry soil を超える値であった．中富良野統は 0.30 m 以下に低位泥炭土が存在する土壌であり，本調査結果と一致する．泥炭が存在するにもかかわらず深さ 0.3-0.4 m とそれ以下である深さ 0.4 m 以下とで pH(H<sub>2</sub>O)，硫酸イオン含有率に違いがみられる．富良野盆地南部における pH(H<sub>2</sub>O)，硫酸イオン含有量の深さ方向分布と泥炭の深さ方向分布に密接な関係は見られなかった．

#### 4.2.2 東西方向分布

図 3.4-3 に富良野盆地南部における pH(H<sub>2</sub>O)，強熱減量，硫酸イオン含有量の東西方向分布を示す．強熱減量は圃場①(東 2 線)，②(東 5 線)，③(東 7 線)で 20-60 g/100g-dry soil，圃場④(東 9 線)では 7.2 g/100g-dry soil であった．圃場①，②，③の土壌は深さ 0.3 m 以下に低位泥炭土が存在する中富良野統に属している．圃場②の強熱減量が少なめであるが，泥炭の影響で強熱減量の値が大きくなっていると考えられる．一方，圃場④は東山統に属し，深さ 0.5 m 付近まではシルト質である．測定された強熱減量は堆肥由来の有機成分のみと考えられる．十勝岳泥流跡地である富良野川に最も近い圃場①の pH(H<sub>2</sub>O)は 3.4 であった．富良野川から離れるほど pH(H<sub>2</sub>O)は高くなり，東 9 線の圃場④では 7.0 であった．一方，硫酸イオン含有量は富良野川に最も近い圃場①で 3g/100g-dry soil 程度と高い値であったが，富良野川から離れるほど硫酸イオン含有量は小さくなり，富良野川から最も離れた東 9 線の圃場④では約 0.005g/100g-dry soil であった．十勝岳泥流跡地である富良野川に近い圃場では，土壌が十勝岳泥流の影響を受けて硫酸酸性であるものの，富良野川から離れるほどその影響は小さくなってことがわかった．

## 5. 統計学的解析

### 5.1 分散分析および平均値検定

これまでは富良野盆地地区全体での傾向を検討したが，同一圃場では各測定項目に対してそれぞれ 15 個(5 点 3 深度)のデータが得られる．これらの得られたデータからそれぞれの圃場について平面的な広がりや深さ方向分布に関する客観的情報を得るため，統計学的手法で解析した．

分散分析および平均値検定は工業製品の品質管理に使用されている一般的な解析方法であり，分散分析では F 検定，平均値検定では t 検定を行う．両検定による解析方法の詳細説明については品質管理に関する書籍(外島，1975)を参照されたい．分散分析については二元配置法による解析とした．

## 5.2 解析結果および考察

分散分析の一例として、丘陵部圃場で測定したリン酸データの解析結果を表 3.5-1 に示す。その結果、深さ方向については計算した分散比が F 値よりも大きくなった。これは深さ方向に 5%有意差があることを示している。他のデータについても同様の解析結果が得られた。一方、採取ポイントについては計算した分散比が F 値よりも小さくなった。同一圃場内であれば採取ポイントが異なっても分散には 5%有意差はないことが明らかとなった。これはリン酸以外のデータにおいても同様であった。1 圃場あたりのサンプリング箇所を 5 箇所としていたが、それ以下に削減できる可能性を示唆している。

平均値検定の一例として、丘陵部圃場で測定した EC データの解析結果を表 3.5-2 に示す。その結果、深さ方向については B 層と C 層の間に 5%有意差が認められた。一方、採取ポイントについては 5%有意差はないことが明らかとなった。これは EC 以外のデータにおいてもほぼ同様であり、深さ方向分布が重要であることがわかった。有意差ありと判断された深さは、平坦部圃場の場合は耕盤と思われる深さ、丘陵部圃場の場合は岩盤に近い深さである。このことから、土壌硬度を指標とした調査・解釈が可能であると考えられる。なお、表 3.5-2 の採取ポイント 1 と 5 のように同一圃場内でも離れている場合、有意差なしと判断される数値であるものの、比較的大きな数値となっていた。採取ポイント 1 と 5 は供給用水の上流側、下流側に対応することから、大規模化などの整備を行った場合、用水供給方法が影響を与える可能性がある。

## 6. 結言

富良野盆地の丘陵部に位置する畑地圃場の作土層に関する基礎的データの収集を目的として、乾式篩い分けした土壌を用いて土壌水分と強熱減量の関係、粒径とイオン吸着量の関係について実験的に検討した。また、富良野盆地南部に位置する平坦部の畑地圃場において、土壌の諸特性におよぼす十勝岳泥流の影響を検討するため、土壌の pH(H<sub>2</sub>O)、強熱減量、硫酸イオン含有量を測定した。その結果、次の知見が得られた。

- (1) 土壌水分、強熱減量に対する検討から、富良野地区の農業用土壌の保水性が圃場の立地条件により異なることがわかった。
- (2) 土壌水分と強熱減量には関係があることがわかった。
- (3) JIS 標準篩を用いて土壌試料の乾式篩い分けを行ったところ、土壌の粒径範囲は 0.075–2.360 mm で、平均粒径は 0.52 mm であっ



た．同試料について湿式篩い分けを行ったところ，土壤の粒径範囲は 0.003–2.360 mm で，平均粒径は 0.21 mm であった．また，同試料をイオン交換水に懸濁させてからレーザー回折・散乱法で測定したところ，粒径範囲は 0.005–2.000 mm で，平均粒径は 0.16 mm であった．

- (4) 乾式篩い分けにより分級した土壤試料の  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  は 5.8–6.0 の範囲であり， $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  におよぼす粒径の影響はほとんど見られなかった．
- (5) 乾式篩い分けにより分級した場合，粒径が 0.250 mm 以上の土壤粒子に比べて 0.250 mm 未満の土壤粒子は強熱減量成分が多く含まれており，電解質を多く吸着している．
- (6) 乾式篩い分けにより分級した土壤粒子のうち，粒径が 0.250 mm 未満の土壤粒子は陽イオンよりも陰イオンを吸着しやすい．
- (7) 富良野盆地南部に位置する平坦部の畑地圃場において， $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  と硫酸イオン含有量の深さ方向分布に反比例関係が見られた．しかし，それらと泥炭の深さ方向分布に密接な関係は見られなかった．
- (8) 十勝岳泥流跡地である富良野川およびヌッカクシ富良野川から東へ離れるほど十勝岳泥流の影響が小さくなる傾向にある．
- (9) 分散分析，平均値検定の結果，現在の圃場規模の場合，栄養成分等の検討を行う場合，深さ方向分布に注意する必要がある．

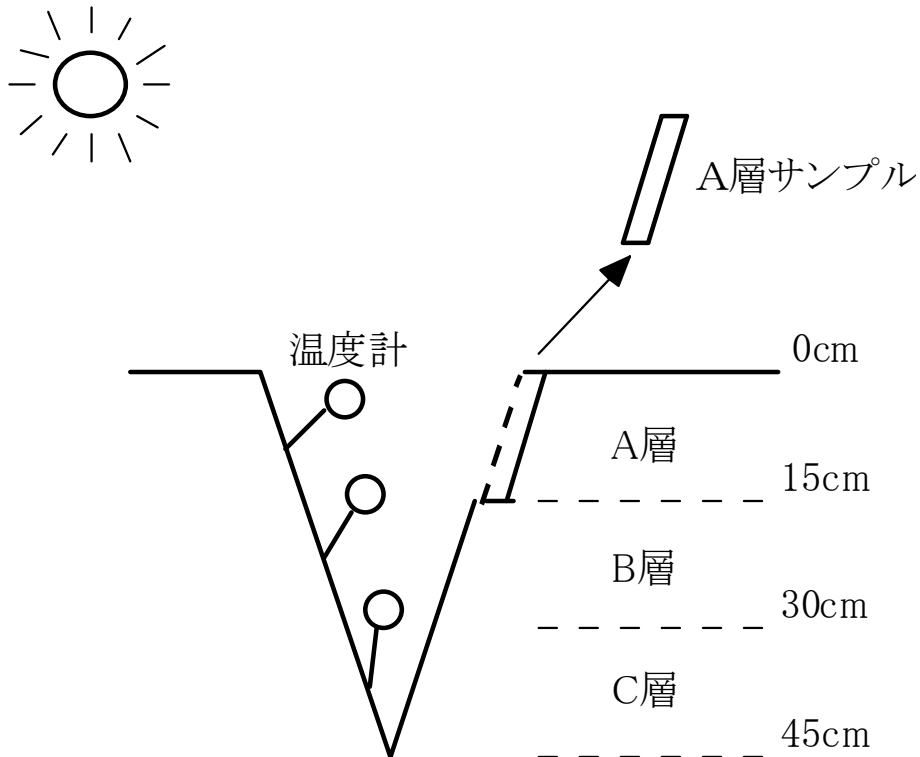


図 3.2-1 土壌採取方法

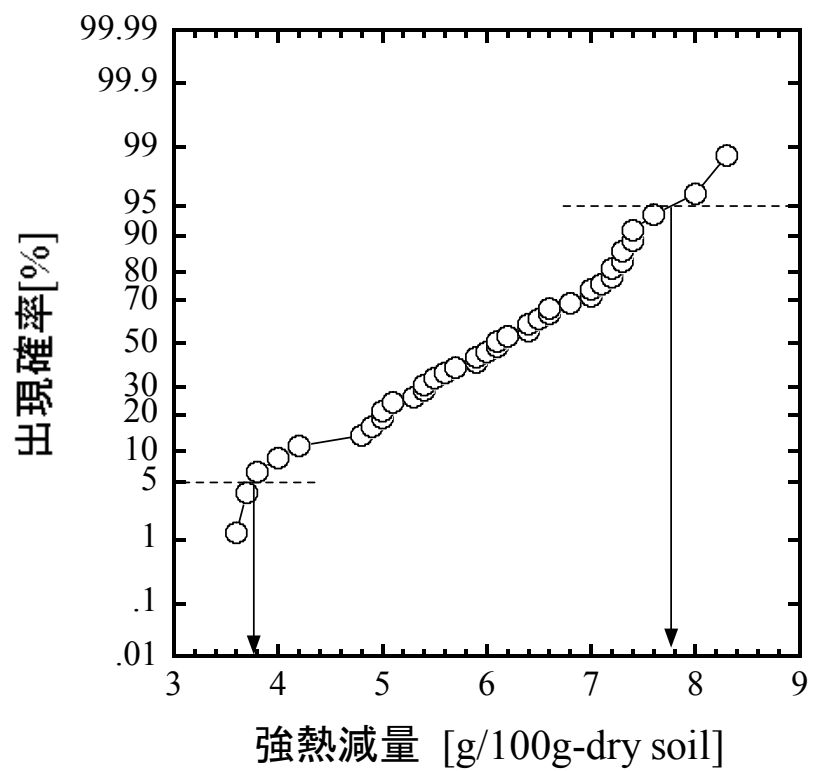


図 3.2-2 丘陵部 A 層の強熱減量データ出現確率

表 3.2-1 強熱減量の範囲(2003 年秋)

地形	A 層	B 層	C 層
丘陵部	3.8-7.8	3.8-7.9	3.9-8.8
平坦部	8.0-14	9.0-32	12-60

単位は g/100g-dry soil

表 3.2-2 平均値検定の結果

検定対象	t 値(計算)	5%有意差
< 丘陵部検定 >		
丘陵部 A 層－丘陵部 B 層	0.168	なし
丘陵部 B 層－丘陵部 C 層	0.435	なし
丘陵部 A 層－丘陵部 C 層	0.602	なし
< 平坦部検定 >		
平坦部 A 層－平坦部 B 層	3.021	あり
平坦部 B 層－平坦部 C 層	3.382	あり
平坦部 A 層－平坦部 C 層	5.102	あり
< 地形差検定 >		
丘陵部 A 層－平坦部 A 層	11.955	あり
丘陵部 B 層－平坦部 B 層	8.961	あり
丘陵部 C 層－平坦部 C 層	6.995	あり

※t 値が 2.000 以上で有意差あり

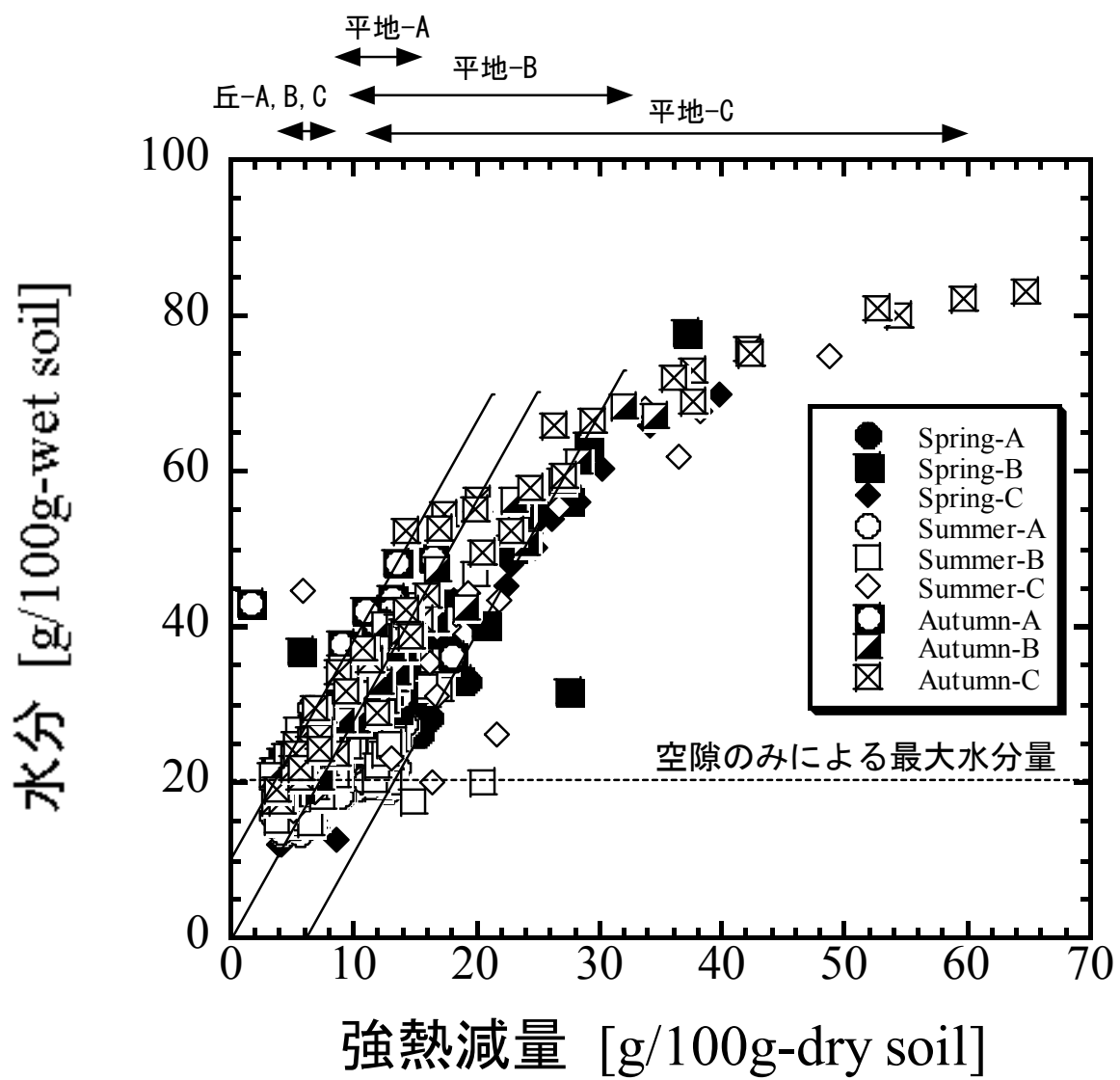


図 3.2-3 土壤の水分に及ぼす強熱減量の影響

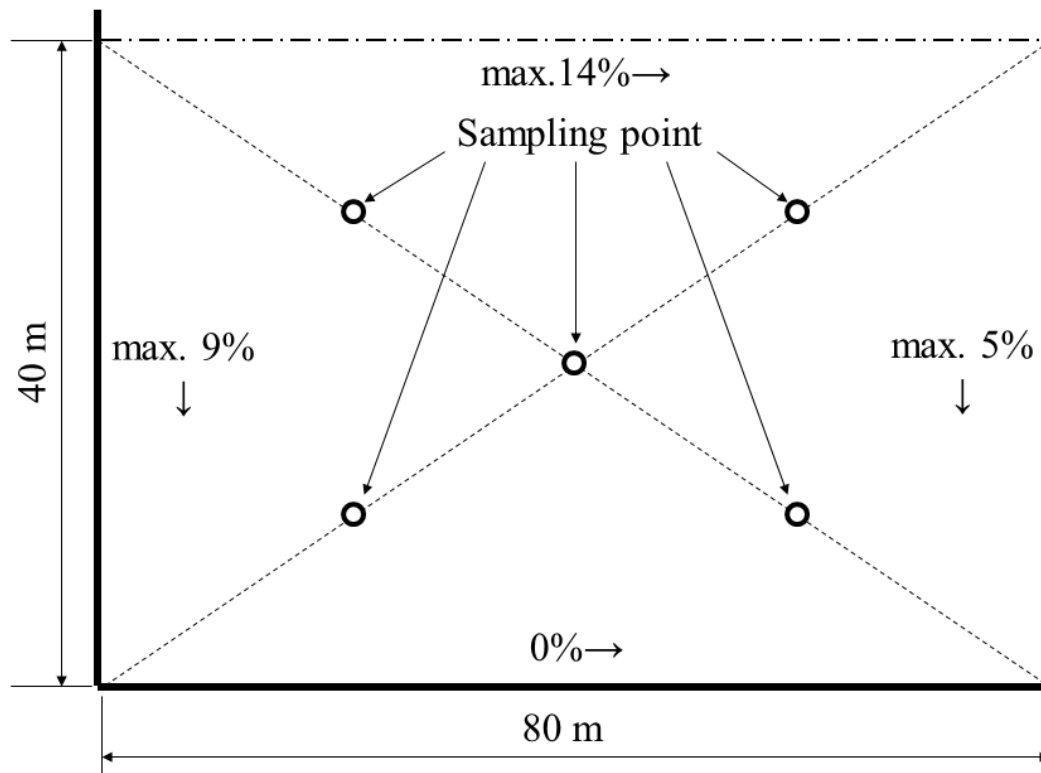


図 3.3-1 丘陵部にある玉ねぎ圃場の概要

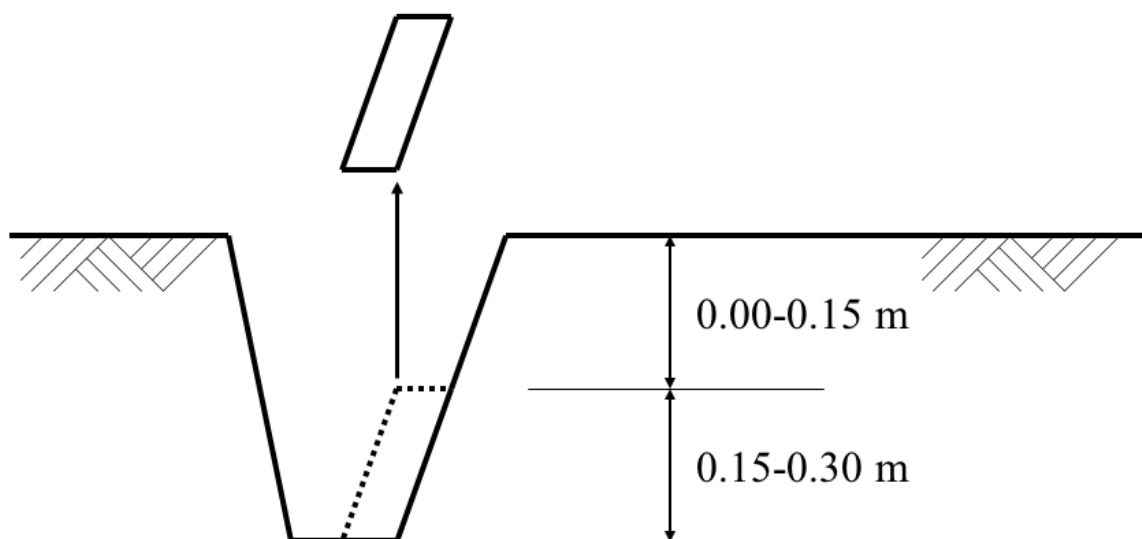


図 3.3-2 土壌採取方法



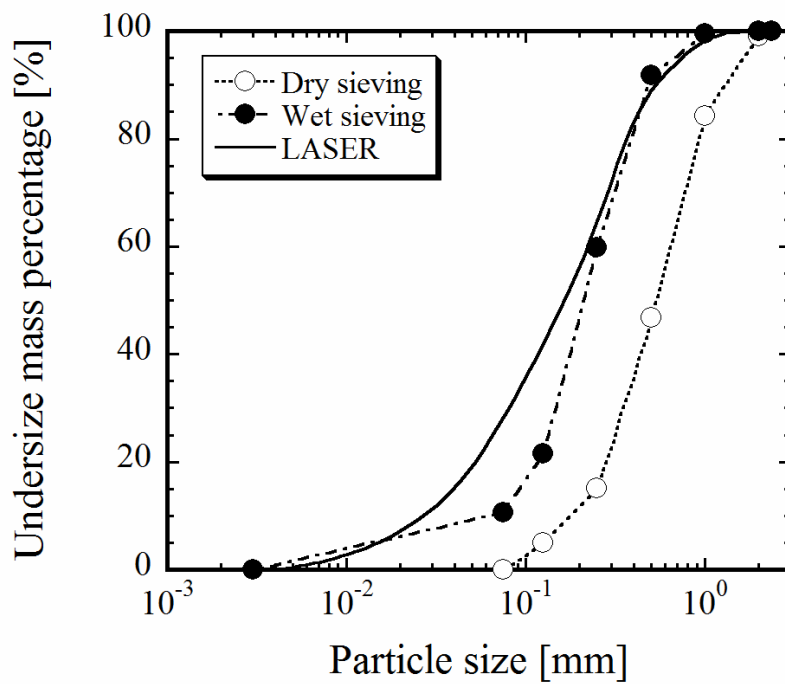


図 3.3-3 土壌の粒径分布

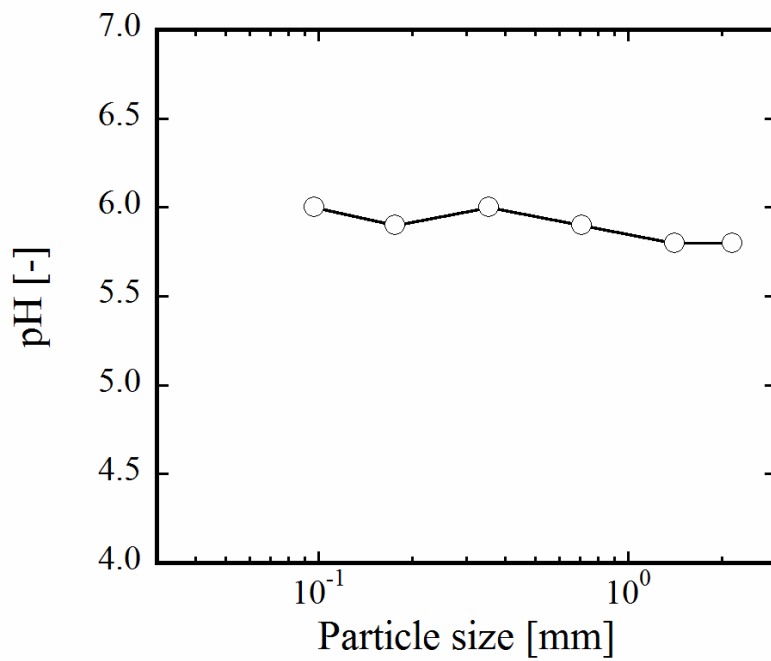


図 3.3-4 pH(H<sub>2</sub>O)と土壌粒径の関係

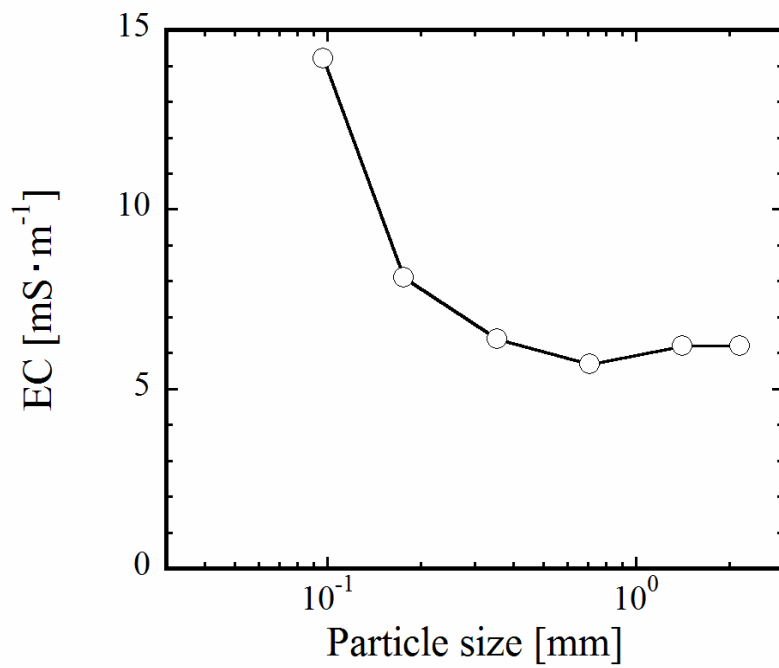


図 3.3-5 EC と土壌粒径の関係

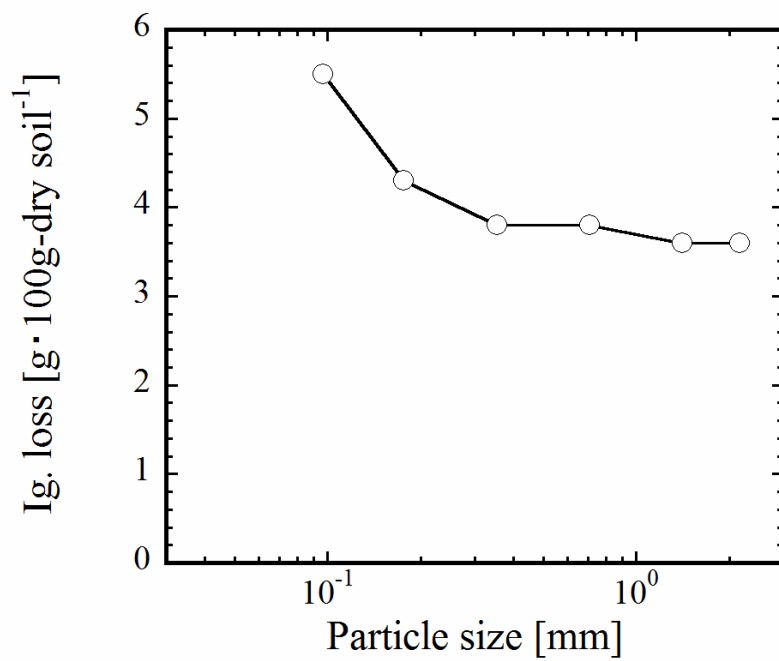


図 3.3-6 強熱減量と土壌粒径の関係

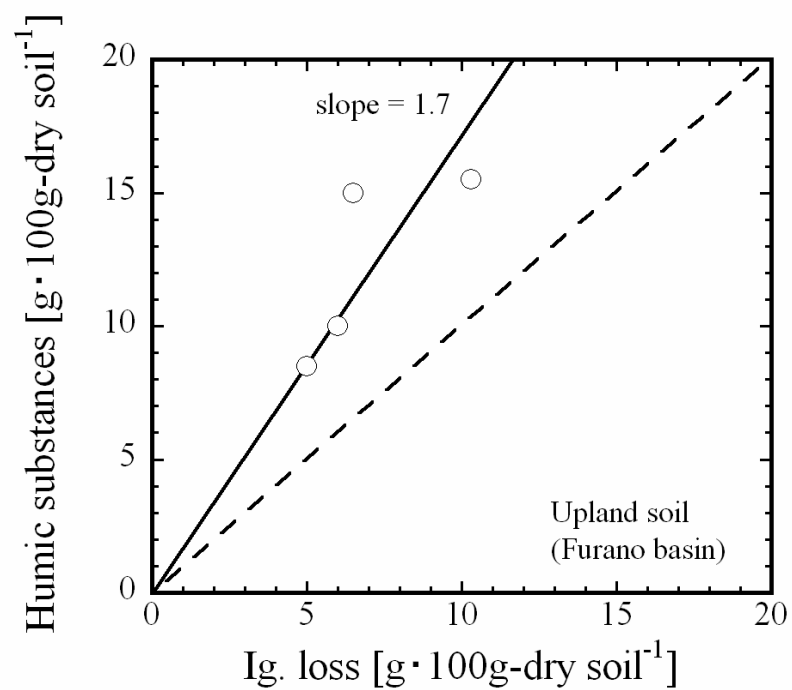


図 3.3-7 強熱減量と腐植量の関係

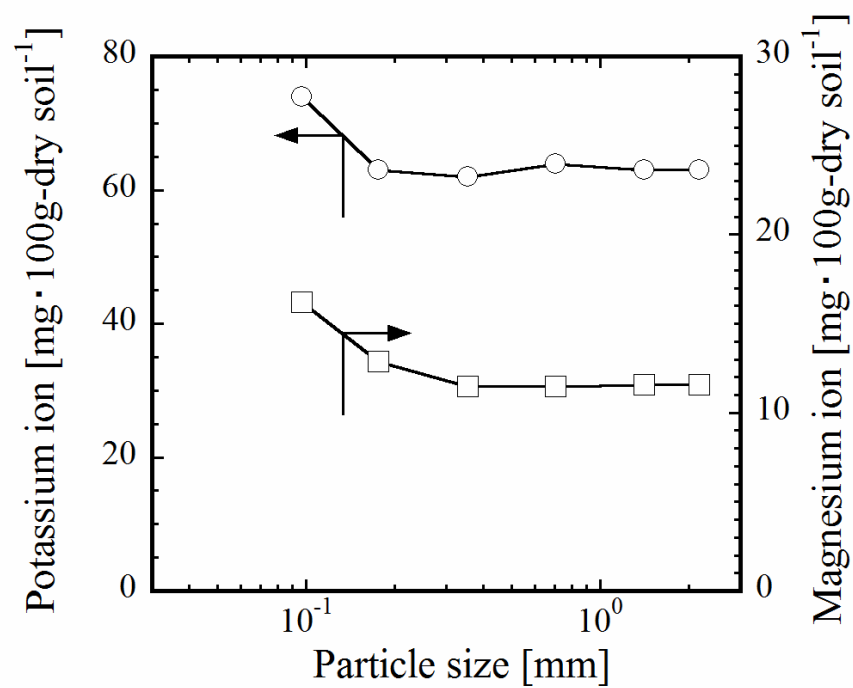


図 3.3-8 陽イオン吸着量と土壌粒径の関係

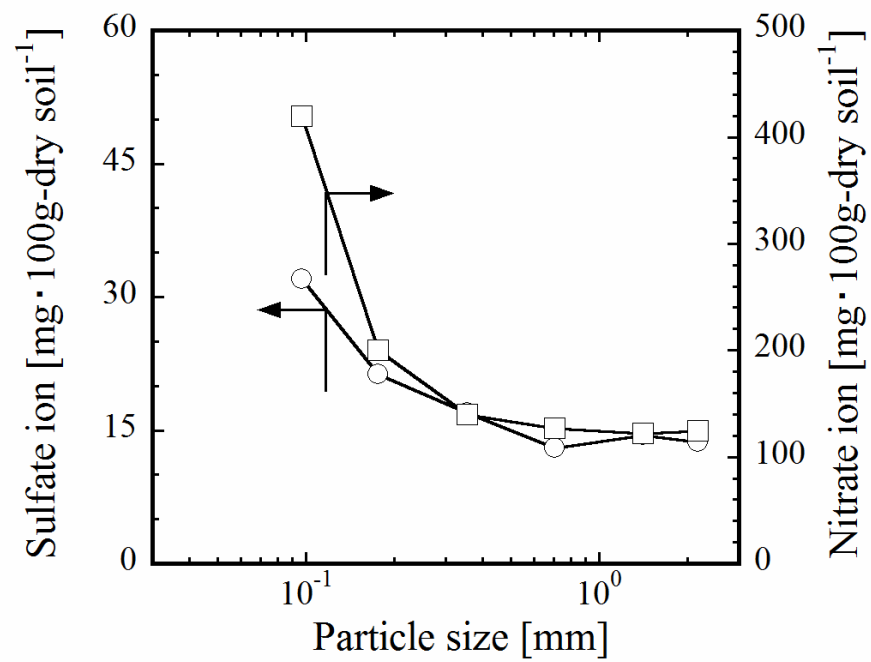


図 3.3-9 陰イオン吸着量と土壌粒径の関係

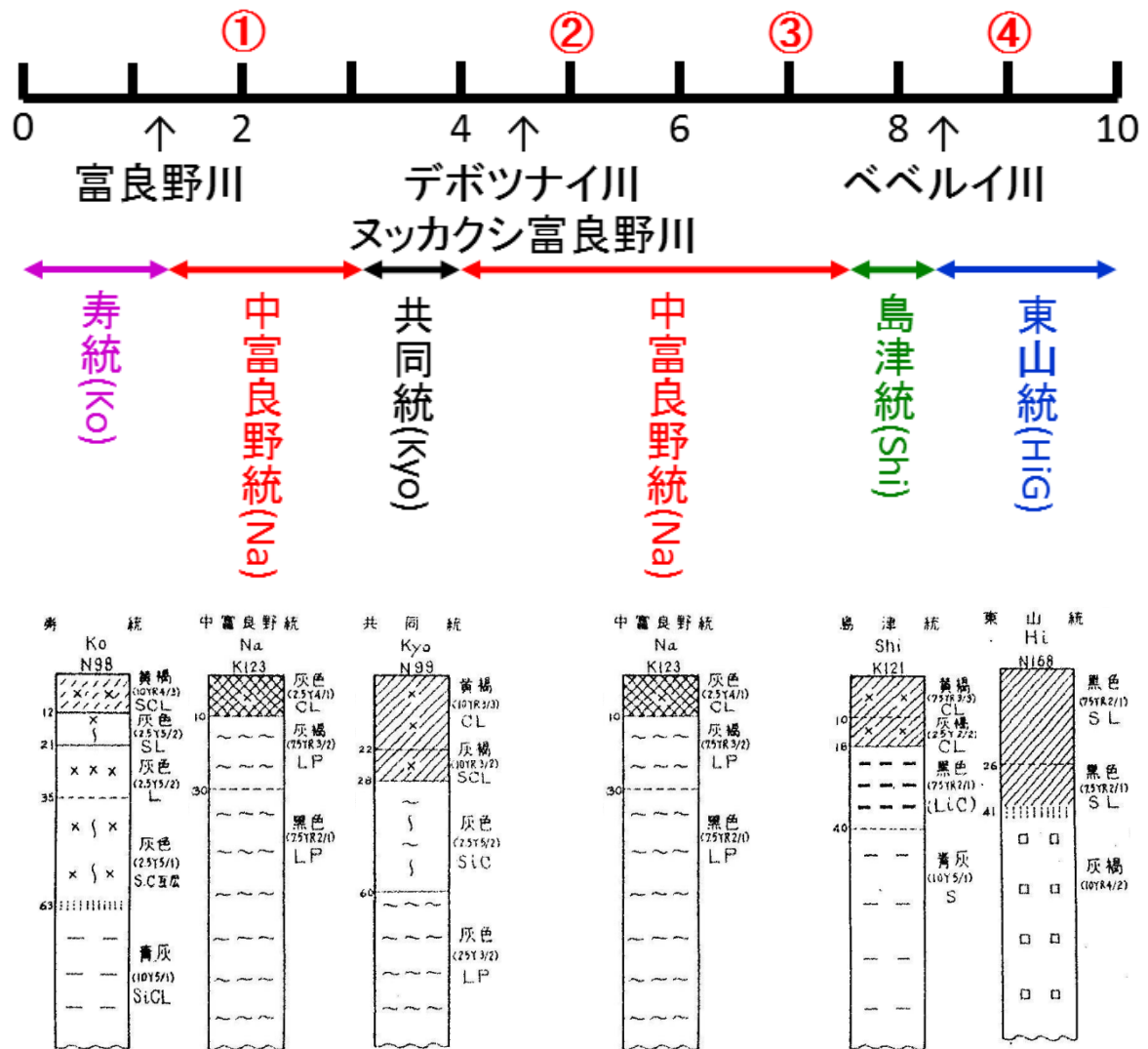


図 3.4-1 圃場，河川位置と土壌区分（北 6-8 号）



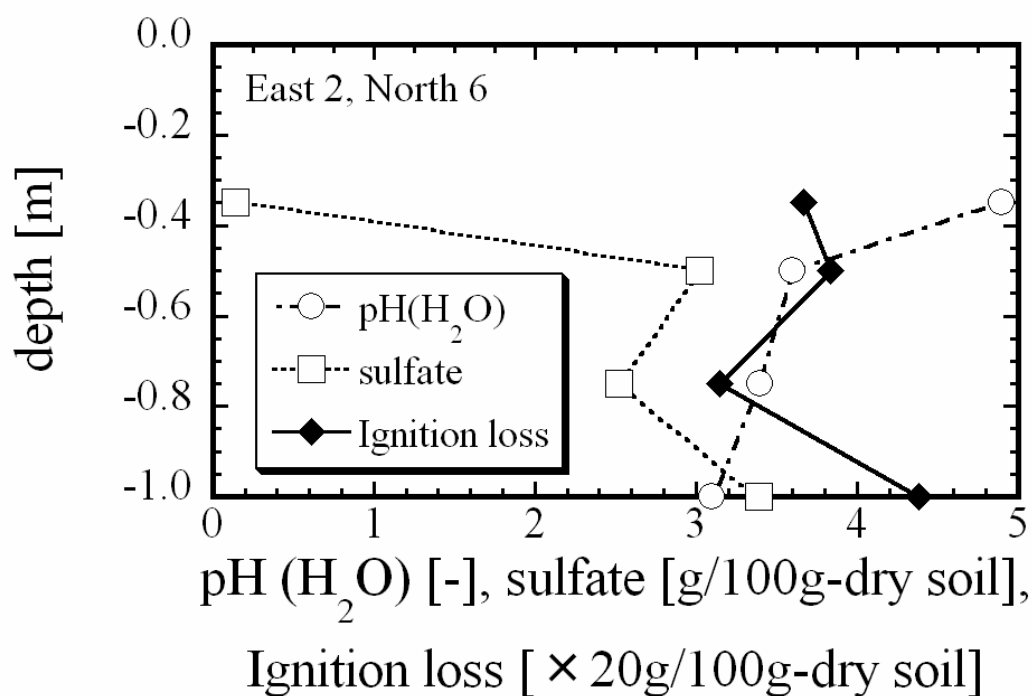


図 3.4-2 pH(H<sub>2</sub>O), 強熱減量, 硫酸イオン含有量の深さ方向分布

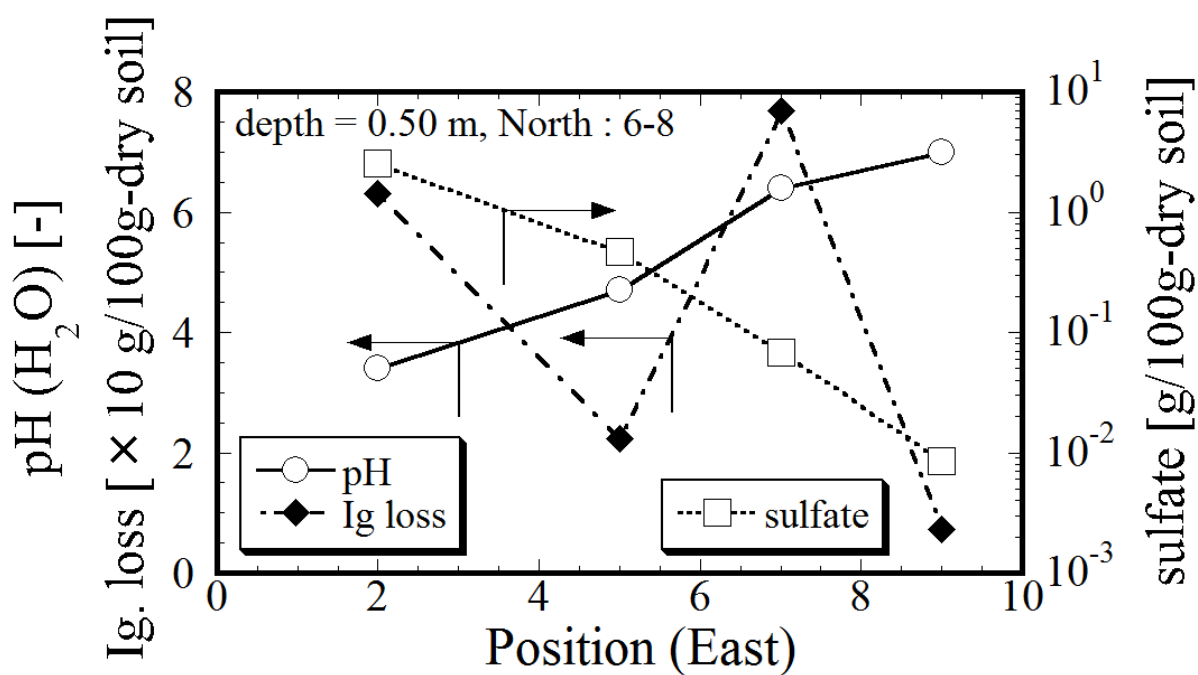


図 3.4-3 pH(H<sub>2</sub>O), 強熱減量, 硫酸イオン含有率の東西方向分布

表 3.5-1 リン酸の分布と分散分析結果（二元配置法）

	1	2	3	4	5	
A	12.0	12.0	7.0	9.2	10.2	50.40
B	5.5	5.9	2.2	1.7	4.8	20.10
C	1.4	1.1	0.5	2.1	1.8	6.90
	18.90	19.00	9.70	13.00	16.80	77.40

要因	平方和	自由度	分散	分散比	F 値
深 さ	199.0	2	99.49	64.040	4.46
位 置	21.8	4	5.45	3.508	3.84
残 差	12.4	8	1.55	あり	なし
計	233.2	14			

表 3.5-2 EC の分布と平均値検定結果

	1	2	3	4	5	
A	5.05	4.33	3.56	4.08	3.44	4.09
B	6.27	5.26	4.34	4.22	4.12	4.84
C	3.66	3.04	3.69	3.73	3.18	3.46
	5.0	4.2	3.9	4.0	3.6	
SA	1.68	$V_{AB}$	0.6321	$t_{AB}=$	1.4916	2.306
SB	3.37	$V_{BC}$	0.4743	$t_{BC}=$	3.1727	2.306
SC	0.42	$V_{AC}$	0.2629	$t_{AC}=$	1.9489	2.306
S1	3.41	$V_{12}$	1.474	$t_{12}=$	0.7902	2.776
S2	2.49	$V_{23}$	0.709	$t_{23}=$	0.5043	2.776
S3	0.35	$V_{34}$	0.119	$t_{34}=$	0.5204	2.776
S4	0.13	$V_{45}$	0.150	$t_{45}=$	1.3614	2.776
S5	0.47	$V_{13}$	0.940	$t_{13}=$	1.4274	2.776
		$V_{14}$	0.885	$t_{14}=$	1.2805	2.776
		$V_{15}$	0.971	$t_{15}=$	1.7571	2.776
		$V_{24}$	0.653	$t_{24}=$	0.3031	2.776
		$V_{25}$	0.739	$t_{25}=$	0.8974	2.776
		$V_{35}$	0.205	$t_{35}=$	0.7662	2.776
					あり	なし

## 第4章 浮力秤量法による農業用資材，土壌粒子の粒径分布測定

### 1. 緒言

第3章で土壌の粒径が栄養塩吸着量に影響を及ぼすことが判明した．この知見から，土壌の粒径分布を測定することで，その土壌が持つ栄養塩保持能力を推定できると考えられる．本章では，土壌，石灰石やマグネサイトなどの鉱物粒子の粒径分布測定を目的として，浮力秤量法による球形ガラスビーズ，JIS 試験用粉体，マグネサイト，軽焼マグネシア，畑地土壌の粒径分布測定を行った．得られた結果を，各種沈降法，レーザー回折散乱法，電気抵抗試験方法による結果と比較した．

### 2. 理論

図 4-1 に水などの分散媒中を沈降する等密度粒子の模式図を示す．図 4-1(a)は時刻 0 での状態である．このとき，粒子が液面位置まで均一に分散していると仮定する．粒子の密度を  $\rho_P$ ，分散媒密度を  $\rho_L$ ，単位スラリー体積あたりの粒子質量を  $C_0$  とすると，懸濁液の初発密度  $\rho_{S0}$  は次式で求められる．

$$\rho_{S0} = \rho_L + \frac{C_0}{\rho_P}(\rho_P - \rho_L) \quad (4-1)$$

浸漬させた秤量棒の体積を  $V_B$  とすると，秤量棒に作用する浮力  $W_0$  は，

$$W_0 = V_B \rho_{S0} g \quad (4-2)$$

で求められる．秤量棒の密度を  $\rho_B$  とすると，懸濁液中にある秤量棒に作用するみかけの力  $G_0$  は，秤量棒に作用する重力と浮力  $W_0$  により次式で計算できる．

$$G_0 = V_B \rho_B g - W_0 = V_B (\rho_B - \rho_{S0}) g \quad (4-3)$$

時間の経過とともに粒子は液中を沈降するが，液の粘性抵抗のため大粒子は沈降速度が大きく，小粒子は沈降速度が小さい．図 4-1(b)で示すように秤量棒下端よりも下まで沈降した大粒子および一部の小粒子は秤量棒に感知されない．この状態の懸濁液密度  $\rho_S$ ，秤量棒に作用する浮力  $W$ ，秤量棒に作用するみかけの力  $G$  は，

$$\rho_S = \rho_L + \frac{C}{\rho_P}(\rho_P - \rho_L) \quad (4-4)$$

$$W = V_B \rho_S g \quad (4-5)$$

$$G = V_B \rho_B g - W = V_B (\rho_B - \rho_S) g \quad (4-6)$$

となる．図 4-1(c)に示すように，全粒子が秤量棒下端よりも下まで沈降すると，秤量棒が感知する単位スラリー体積あたりの粒子質量  $C$  はゼロとなるため，懸濁液密度  $\rho_S$  は分散媒密度  $\rho_L$  と等しくなる．そのため，全粒子が秤量棒下端よりも下まで沈降した際の懸濁液密度  $\rho_{S\infty}$ ，秤量棒に作用する浮力  $W_\infty$ ，秤量棒に作用するみかけの力  $G_\infty$  は，次式から求めることができる．

$$\rho_{S\infty} = \rho_L \quad (4-7)$$

$$W_\infty = V_B \rho_L g \quad (4-8)$$

$$G_{\infty} = V_B \rho_B g - W_{\infty} = V_B (\rho_B - \rho_L) g \quad (4-9)$$

図 4-2 に浮力秤量法による粒径分布測定の図解法を示す。粒子の粒径を  $x$ ，粒径分布を  $f(x)$ ，粒子の沈降速度分布を  $v(x)$ ，秤量棒長さを  $h$ ，時刻  $t_i$  において秤量棒下端よりも上に存在する単位スラリー体積あたりの粒子質量を  $C$  とすると，秤量棒下端よりも下に存在する単位スラリー体積あたりの粒子質量  $C_0 - C$  は，次式で表される (Allen, 1990)。

$$C_0 - C = C_0 \int_{x_i}^{x_{\max}} f(x) dx + C_0 \int_{x_{\min}}^{x_i} \frac{v(x)t}{h} f(x) dx \quad (4-10)$$

式(4-10)の右辺第1項は沈降速度  $h/t_i$  に相当する粒径  $x_i$  より大きな単位スラリー体積あたりの粒子質量を示し，右辺第2項は粒径  $x_i$  より小さい粒子群のうち秤量棒下端よりも下に存在する単位スラリー体積あたりの粒子質量を示す。式(4-2)，(4-5)，(4-8)より，次の2式が導かれる。

$$W_0 - W = V_B \frac{\rho_P - \rho_L}{\rho_P} g (C_0 - C) \quad (4-11)$$

$$W_0 - W_{\infty} = V_B \frac{\rho_P - \rho_L}{\rho_P} g C_0 \quad (4-12)$$

式(4-10)，(4-11)，(4-12)より，

$$W_0 - W = (W_0 - W_{\infty}) \int_{x_i}^{x_{\max}} f(x) dx + (W_0 - W_{\infty}) \int_{x_{\min}}^{x_i} \frac{v(x)t}{h} f(x) dx \quad (4-13)$$

となる。式(4-13)を時間で微分すると，

$$-\frac{dW}{dt} = (W_0 - W_{\infty}) \int_{x_{\min}}^{x_i} \frac{v(x)}{h} f(x) dx \quad (4-14)$$

が得られる。これを式(4-13)に代入して整理すると次式が得られる。

$$W = W_R + \left( \frac{dW}{dt} \right) t \quad (4-15)$$

ここで，

$$W_R = W_0 - (W_0 - W_{\infty}) \int_{x_i}^{x_{\max}} f(x) dx \quad (4-16)$$

である。式(4-6)を微分すると次式が得られる。

$$\frac{dG}{dt} = -\frac{dW}{dt} \quad (4-17)$$

式(4-6)に式(4-15)，(4-17)を代入して整理すると，

$$G = V_B \rho_B g - W_R + \left( \frac{dG}{dt} \right) t = G_R + \left( \frac{dG}{dt} \right) t \quad (4-18)$$

が得られる。ここで，

$$G_R = V_B \rho_B g - W_R \quad (4-19)$$

である。積算通過百分率  $D$  は，次式で求めることができる。

$$D = 100 - R = 100 - \left( \frac{G_0 - G_R}{G_0 - G_\infty} \right) \times 100 \quad (4-20)$$

また，時刻  $t$  までに秤量棒下端までの距離  $h$  を沈降する粒子の沈降速度  $v(x)$  は次式で求められる．

$$v(x) = \frac{h}{t} \quad (4-21)$$

液粘度を  $\mu_L$ ，重力加速度を  $g$  とすると，沈降速度  $v(x)$  を持つ粒子の粒径  $x$  はストークスの式により求めることができる．

$$x = \sqrt{\frac{18\mu_L v(x)}{g(\rho_P - \rho_L)}} \quad (4-22)$$

図 4-2(右上)に示すように，秤量棒に作用するみかけの力  $G$  の経時変化を調べ，式(4-22)を用いて各時刻における粒子径  $x_i$  (同図右下)を求める．時刻  $t$  における接線を引き，その切片  $G_R$  を用いて式(4-20)で積算通過百分率  $D_i$  を求める．任意時刻  $t_i$  における粒子径  $x_i$  と積算通過百分率  $D_i$  の両者をプロットすることで懸濁している粒子の粒径分布曲線(同図左上)を作成できる．なお，重力加速度  $g$  は定数であるから，秤量棒に作用するみかけの力  $G$  ではなく，秤量棒のみかけ質量  $M (=G/g)$  を測定することで粒径分布を求めることができる．以上の式は沈降天秤法(Allen, 1990)とほぼ同じである．沈降した粒子を対象とする測定方法が沈降天秤法であり，液中に残っている粒子を対象とする測定方法が浮力秤量法である．

### 3. 実験装置および方法

図 4-3 に実験装置の概略図を示す．この粒径分布測定装置は，精密電子天秤 (GR-300，最小読取質量 0.1 mg，エー・アンド・ディ製)，データロガーであるノート型パソコン，秤量に用いる秤量棒(直径 10 mm，長さ 210 mm)，懸濁液を入れる 1000 ml メスシリンダー(直径 65 mm，サンブラテック製)，縦 500 mm，横 500 mm，高さ 1200 mm のアルミニウムアングル製のフレーム，気流や温度変化等の外乱を防止するための風除板および実験温度を一定に維持するためのヒーターからなる．精密電子天秤は RS-232C を介してパソコンと接続し，自動計測ができるようにした．

使用粉体として，JIS 試験用粉体 2 ガラスビーズ GBL30(ソーダライムシリケート，密度 2500 kg/m<sup>3</sup>，中位径 30  $\mu$ m，球形)，ガラスビーズ GB-AI(ソーダガラス，密度 2500 kg/m<sup>3</sup>，中心粒径 53  $\mu$ m 以下，球形)，JIS 試験用粉体 1 3 種(ケイ砂，密度 2700 kg/m<sup>3</sup>，中位径 6.6–8.6  $\mu$ m，不規則形状)，JIS 試験用粉体 1 16 種(重質炭酸カルシウム，密度 2800 kg/m<sup>3</sup>，中位径 3.6–4.6  $\mu$ m，不規則形状)，マグネサイト粉砕物(中華人民共和国遼寧省岫岩地区産，密度 3000 kg/m<sup>3</sup>，270 メッシュ以下，不定形の破砕粒子)と軽焼マグネシア(海城化宇集团有限公司，密度 2400 kg/m<sup>3</sup>，270 メッシュ以下，不定形の



破碎粒子), 農地土壌(中富良野町, 密度  $2620 \text{ kg/m}^3$ ,  $2 \text{ mm}$  以下)を使用した. 液温度は  $298 \text{ K}$  で一定とした. 粒径分布測定を行う際の分散媒としてイオン交換水(密度  $1000 \text{ kg/m}^3$ , 粘度  $0.89 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ), 分散剤としてヘキサメタリン酸ナトリウム(鹿特級, 関東化学製)を  $0.3\text{wt}\%$ の濃度で用いた. 土壌の場合は水飴水溶液(密度  $1340 \text{ kg/m}^3$ , 粘度  $275 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ )を用いた. 粒子密度, 液密度はピクノメーターで, 液粘度はウベレーデ粘度計で測定した. 懸濁液中の試料粉体濃度は  $10 \text{ kg/m}^3$  で一定とした. 秤量棒として幅  $5.0 \text{ mm}$  のスリット 2 本が入った外径  $39.8 \text{ mm}$ , 内径  $30.0 \text{ mm}$ , 長さ  $210 \text{ mm}$  のアルミニウム製円管(密度  $2700 \text{ kg/m}^3$ )と, 直径  $10 \text{ mm}$ , 長さ  $210 \text{ mm}$  のアルミニウム棒(円柱型, 密度  $2700 \text{ kg/m}^3$ ), ステンレス SUS304 棒(円柱型, 密度  $7900 \text{ kg/m}^3$ ), 銅棒(円柱型, 密度  $8960 \text{ kg/m}^3$ ), アクリル樹脂棒(円柱型, 密度  $1190 \text{ kg/m}^3$ )の 4 種類を用意した.

調製した懸濁液を超音波洗浄機にかけて粒子を分散させた後,  $1000 \text{ ml}$  メスシリンダーに入れた. 秤量棒上部が液面から  $10 \text{ mm}$  であるように事前に調整した後, 攪拌棒を用いて懸濁液を十分攪拌し, 直ちに精密電子天秤より吊るされた秤量棒を懸濁液中に入れた. この時点を実測時刻  $0$  秒として秤量棒質量を精密電子天秤に附属するソフトウェアを用いて  $10$  秒間隔でパソコンに記録した. 実験開始から  $2$  時間経過した時点で測定を終了し, 前述した理論に基づく計算処理を行い, 粒径分布を求めた. 同じ沈降法に分類される沈降天秤法(JIS Z8822), アンドレアゼンピペット法(JIS Z8820-2)による粒径分布, 原理の異なる粒径分布測定法であるレーザー回折散乱法(JIS Z8825-1, MT3000EX, 日機装), 電気抵抗試験方法(JIS R6002), 静的画像解析法(JIS Z8827-1, MIC-D, オリンパス)による粒径分布と浮力秤量法によって得られた粒径分布を比較し, その妥当性を検証した.

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 球形ガラスビーズの粒径分布測定

図 4-4 に JIS 試験用粉体 2 ガラスビーズ GBL30 の懸濁液を用いた場合について, スリット付きアルミニウム製円管を秤量棒として用いた場合のみかけ質量  $M$  の経時変化を示す. この図は図 4-2 の右上図に該当する. 図中には  $M_0$ ,  $M_\infty$  も示した. 時間の経過とともに秤量棒のみかけの質量  $M$  は増加した. 作図による解析法は図 4-2 に示したとおりであるが, データは附属ソフトによりパソコンに送られ, Excel シートに記録される. そのため, その後の解析を Excel ソフトで行った. 任意時刻  $t$  における接線を引き, その直線を外挿することで切片  $M_R$  を求めた. この  $M_R$  から積算通過百分率  $D(x)$  を求めた. 同時刻での粒径  $x$  は式(4-22)から求められる. このようにして求めた各時刻での粒径  $x$  と積算通過百分率  $D$  をプロットすると粒径分布が得られる. 浮力秤量法, アンドレアゼンピペット法, レーザー回折散乱法, コールターカウンター法で測定した JIS 試験用粉体 2 ガラスビーズ GBL30 の粒径分布を図 4-5 に示す. 用いたガラスビーズ GBL30 は粒径分布測定器の検定等の試験に用い

られる試験用粉体である。電気抵抗試験方法によって測定した中位径は  $30\ \mu\text{m}$  で、10%径  $x_{10}$  と 90%径  $x_{90}$  の比が 1.3 以下と極端に狭い粒径分布となっているため、ほぼ単一粒子からなる試料とみなすことができる。秤量棒としてスリット付き円管を用いて測定を行った。浮力秤量法で求めた粒径分布は同じ沈降法であるアンドレアゼンピペット法による測定結果と一致した。浮力秤量法により求めた粒径分布から求めた粒径比  $x_{10}/x_{90}$  は 1.30 であり、電気抵抗測定方法による測定結果とほぼ同じ結果が得られた。また、レーザー回折散乱法で測定した粒径分布とよく一致した。以上のことから、浮力秤量法による球形粒子の粒径分布が可能であり、既存の沈降法やレーザー回折散乱法による測定法と同等の粒径分布を得られることがわかった。

浮力秤量法、レーザー回折散乱法で測定したガラスビーズ GB-AI の粒径分布を図 4-6 に示す。秤量棒としてスリット付きアルミニウム製円管を用いた。浮力秤量法で求めた粒径分布とレーザー回折散乱法で測定した粒径分布はほぼ一致した。用いたガラスビーズ GB-AI は  $8\text{--}60\ \mu\text{m}$  の範囲で計測されたことから、粒径比 8 倍程度の粒径分布を持つ球形粒子群についても浮力秤量法によって粒径分布を測定できることがわかった。また、再現性を検討するため、同一条件で 5 回実験を繰り返した。その結果、粒径分布に若干の違いがあるものの、ほぼ同じ粒径分布が得られた。しかし、粒径  $50\ \mu\text{m}$  以上の粒子を測定できていない場合がある。これは攪拌した懸濁液に秤量棒を設置するまでに要した時間の差異や、攪拌による懸濁液の乱れが原因と考えられる。

#### 4.2 非球形粒子の粒径分布測定

次に、粒径分布を持つ非球形粒子への適用を試みた。浮力秤量法で測定した JIS 試験用粉体 13 種(ケイ砂)の粒径分布を図 4-7 に示す。秤量棒材質の影響を検討するため、同一懸濁液で円柱型秤量棒の材質を変えて測定を行った。用いた秤量棒はアクリル樹脂棒、アルミニウム棒、SUS304 棒、銅棒で、それぞれの密度は 1190, 2700, 7900, 8960  $\text{kg/m}^3$  である。測定の結果、秤量棒材質によらずほぼ同じ粒径分布が得られた。このことから、秤量棒の密度が懸濁液密度よりも大きい材料であれば秤量棒として使用できることがわかった。また、JIS 試験用粉体 13 種(ケイ砂)は  $4.5\text{--}68\ \mu\text{m}$  の範囲で計測できたことから、比較的粒径分布が広い粒子群についても粒径分布の測定が可能である。同図中には沈降天秤法、レーザー回折散乱法、アンドレアゼンピペット法による測定結果も示した。沈降天秤法、アンドレアゼンピペット法で測定した粒径分布と浮力秤量法によって測定した粒径分布がほぼ同じとなったことから、浮力秤量法によって測定された粒径分布は、既存の沈降法と同等な粒径分布を与えることがわかった。また、レーザー回折散乱法の結果ともほぼ一致した。以上のことから、浮力秤量法によって非球形粒子群の粒径分布測定が可能である。また、浮力秤量法によって計測時間 2 時間で約  $5\ \mu\text{m}$  まで計測できることがわかった。これよりも小さい粒径まで測定する場合は、式(4-21)、(4-22)より、沈降時間  $t$  を長くする、または、秤量棒長さ  $h$  を短くすることで対応可能である。

### 4.3 石灰石の粒径分布測定

試料として最大粒径が 20  $\mu\text{m}$  の JIS 試験用粉体 1 16 種(重質炭酸カルシウム)を用いて粒径分布測定を行った。秤量棒としてスリット付きアルミニウム製円管を用いた。その結果を図 4-8 に示す。まず、前述した JIS 試験用粉体 1 3 種(ケイ砂)の場合と同様、JIS 試験用粉体 1 16 種(重質炭酸カルシウム)は測定時間 2 時間で粒径約 5  $\mu\text{m}$  まで測定できた。3 種(ケイ砂)同様、同一懸濁液で秤量棒材質を変えて測定を行ったが秤量棒材質によらずほぼ同じ粒径分布となった。このことから、浮力秤量法による粒径分布測定におよぼす秤量棒材質の影響はほとんどないことが確認された。また、浮力秤量法によって測定した粒径分布は同図中に示した沈降天秤法、アンドレアゼンピペット法による測定結果とほぼ同じとなった。このことから、浮力秤量法によって測定された粒径分布は、既存の沈降法と同等な粒径分布を与えることがわかった。一方、レーザー回折散乱法によって測定した粒径分布は、浮力秤量法のデータよりも若干大きい。これは粒子形状の影響とも考えられるが、両者の差は 1  $\mu\text{m}$  程度とわずかであり、現時点ではほぼ一致していると判断した。

### 4.4 マグネサイトおよび軽焼マグネシアの粒径分布測定

これまで得られた知見を基に、マグネサイトの粉砕物および軽焼マグネシアの粒径分布測定を行った。なお、室温付近では酸化マグネシウムを主成分とする軽焼マグネシアの水和反応はほとんど起こらないことが確認されている(大平・小幡, 2009)。試料の粒径は両者とも 270 メッシュ以下、すなわち、53  $\mu\text{m}$  以下である。秤量棒としてスリット付きアルミニウム製円管を用いて測定したマグネサイトの粒径分布を図 4-9 に、軽焼マグネシアの粒径分布を図 4-10 に示す。同図中にはレーザー回折散乱法によって測定した粒径分布も示した。浮力秤量法によって求めた粒径分布はレーザー回折散乱法で測定した粒径分布とほぼ一致している。このことから、マグネサイト粉砕物、軽焼マグネシアについても浮力秤量法によって粒径分布測定が可能であることがわかった。

### 4.5 土壌の粒径分布測定

土壌試料の粒径は 2 mm 以下である。秤量棒としてスリット付きアルミニウム製円管を用いて測定した粒径分布を図 4-11 に示す。同図中にはレーザー回折散乱法、湿式篩い分け法によって測定した粒径分布も示した。湿式篩い分け法の結果よりも小さい粒子が多く検出されている。これは、土壌が単一成分から構成されていないための差異と考えられる。しかし、浮力秤量法によって求めた粒径分布はレーザー回折散乱法で測定した粒径分布とほぼ一致している。このことから、土壌粒子についても浮力秤量法によって粒径分布測定が可能であることがわかった。

## 5. 結論

農業用粒子および土壌粒子の粒径分布測定を目的として、浮力秤量法による球形ガラスビーズ、JIS 試験用粉体、マグネサイト、軽焼マグネシア、土壌粒子の粒径

分布測定を行った。その結果、ガラスビーズを用いた実験により、浮力秤量法による球形粒子の粒径分布が可能であった。JIS 試験用粉体、マグネサイト、軽焼マグネシアを用いた実験により、浮力秤量法によって非球形粒子群の粒径分布測定が可能であった。浮力秤量法によって測定した粒径分布は、既存の沈降法やレーザー回折散乱法による測定法と同等であり、測定時間 2 時間で約 5  $\mu\text{m}$  まで測定できる。水飴水溶液を用いて土壌粒子の粒径分布を測定したところ 100–2000  $\mu\text{m}$  の測定が可能であった。

## 使用記号

$C$  = solid concentration of suspension,  $\text{kg/m}^3$

$D$  = mass percentage undersize of particle size  $x$ , %

$f(x)$  = mass frequency of the particle size  $x$ , -

$G$  = apparent weight of the weighing tool, N

$G_R = V_B \rho_B g - W_R$ , N

$g$  = gravitational acceleration,  $\text{m/s}^2$

$h$  = submerged length of the weighing tool, m

$M$  = apparent mass ( $= G/g$ ), kg

$R$  = mass percentage oversize of particle size  $x$ , %

$t$  = time, s

$v(x)$  = settling velocity of particle size  $x$ , m/s

$V_B$  = submerged volume of the weighing tool,  $\text{m}^3$

$W$  = buoyancy of the weighing tool, kg

$W_R = W_0 - (W_0 - W_\infty) \int_{x_i}^{x_{\max}} f(x) dx$ , kg

$x$  = particle size, m

$\mu_L$  = liquid viscosity,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$

$\rho_B$  = density of bar,  $\text{kg/m}^3$

$\rho_L$  = liquid density,  $\text{kg/m}^3$

$\rho_P$  = particle density,  $\text{kg/m}^3$

$\rho_S$  = slurry density,  $\text{kg/m}^3$

## Subscripts

R = restposten

max = maximum

min = minimum

0 = initial

10 = 10%

90 = 90%

$\infty$  = infinity

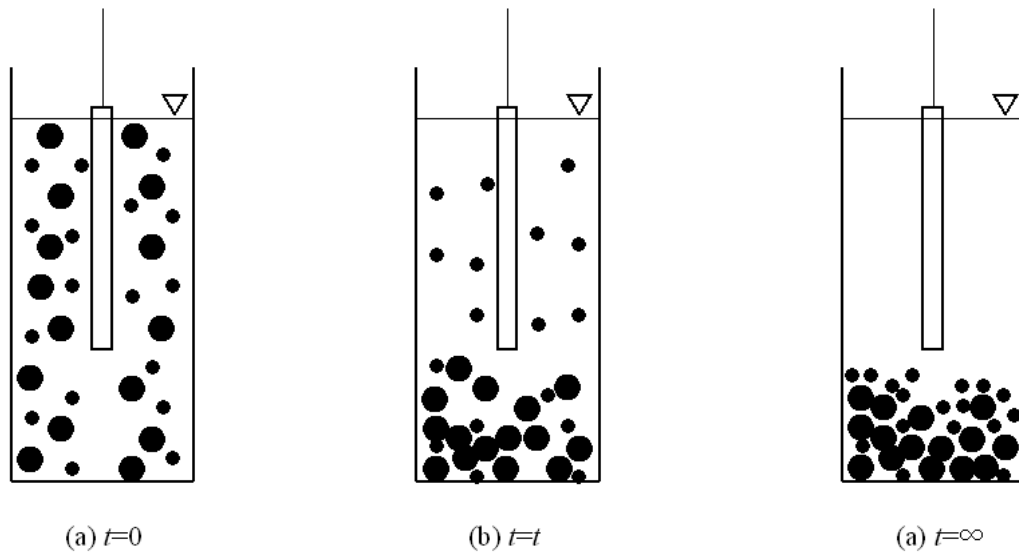


Fig.4-1 Schematic diagrams of settling particles

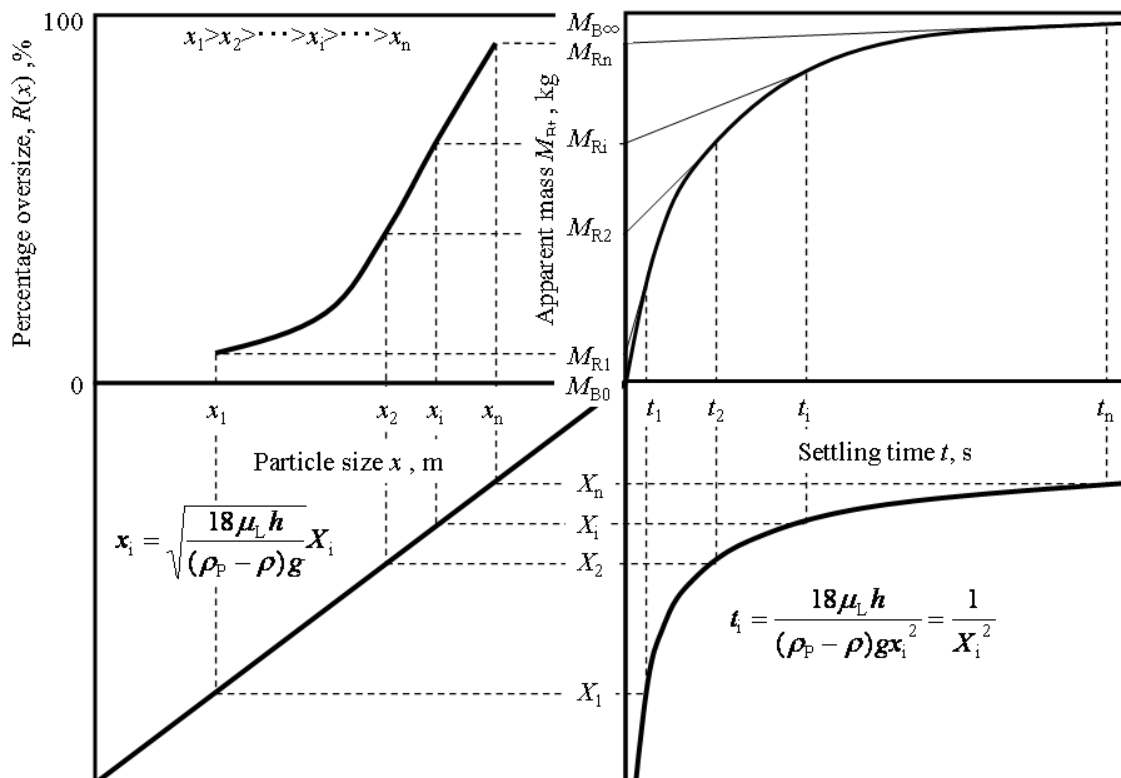


Fig.4-2 Method to determine the particle size distribution using the relationship between the settling time and the apparent mass of the weighing bar



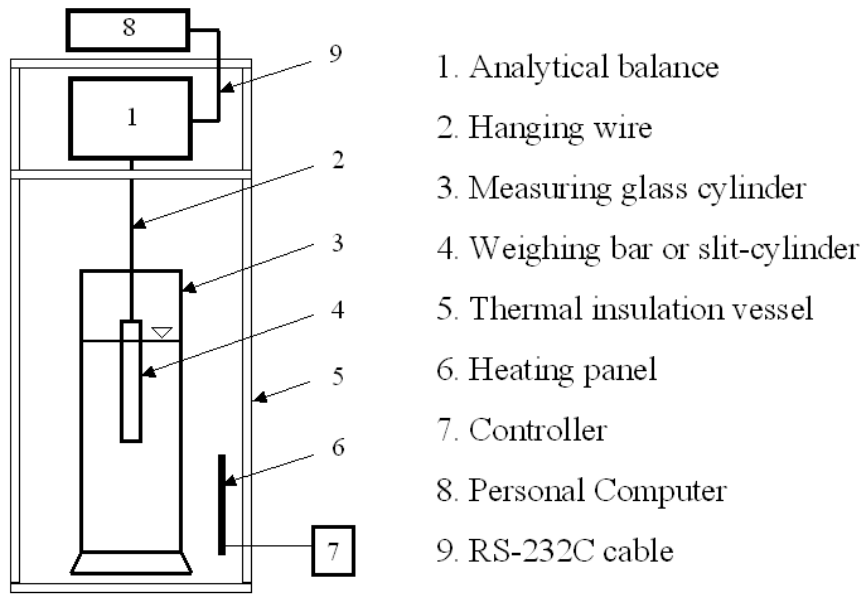


Fig.4-3 Schematic diagrams of experimental setup

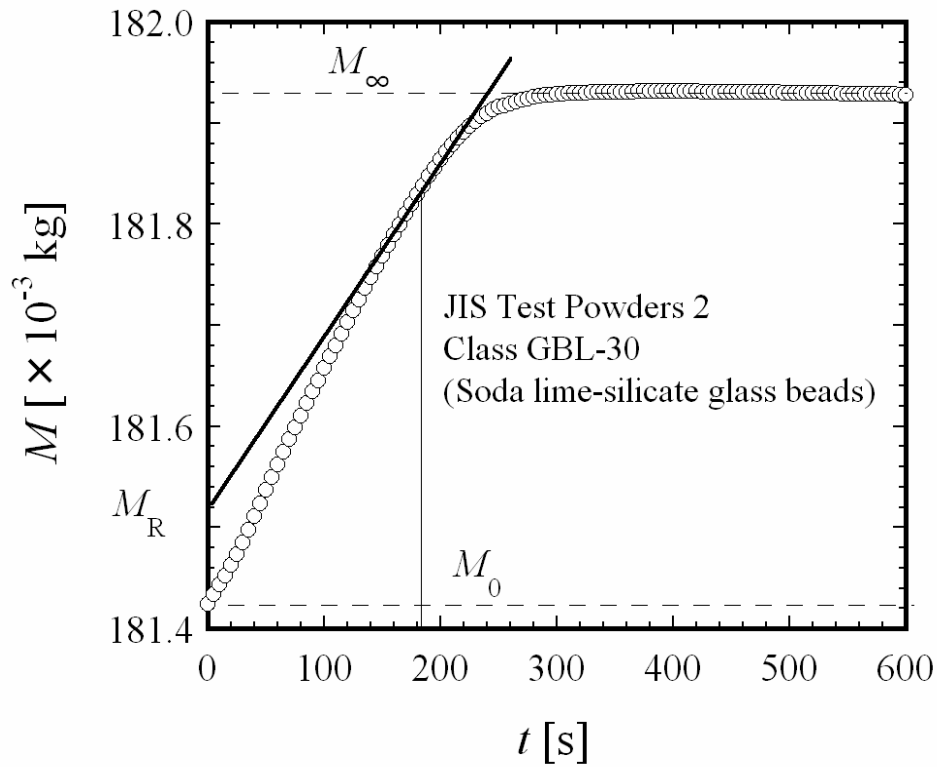


Fig.4-4 Apparent mass of the weighing tool as a function of time (Soda lime–silicate glass, Spherical, JIS Test Powders 2, Class GBL30)

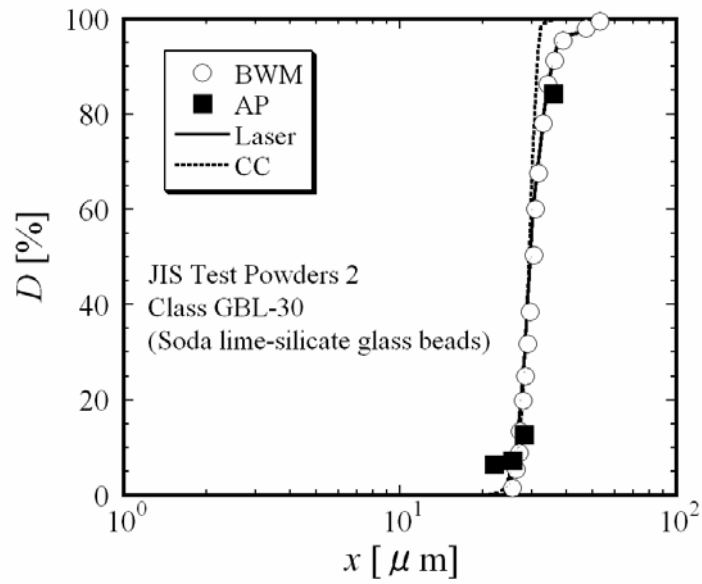


Fig.4-5 Particle size distribution (Soda lime-silicate glass, Spherical, JIS Test Powders 2, Class GBL30)

BWM=Buoyancy weighing-bar method, AP=Andreasen pipette method, CC=Coulter counter method

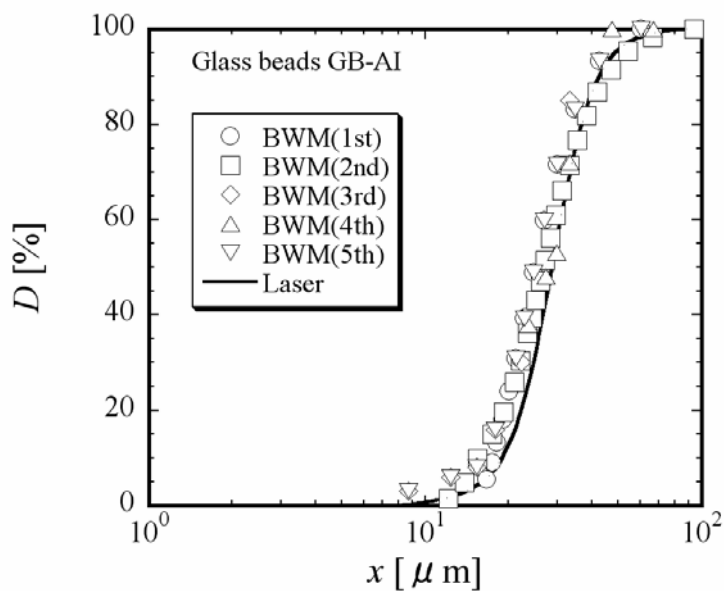


Fig.4-6 Particle size distribution (Soda lime-silicate glass, Spherical, GB-AI)

BWM=Buoyancy weighing-bar method

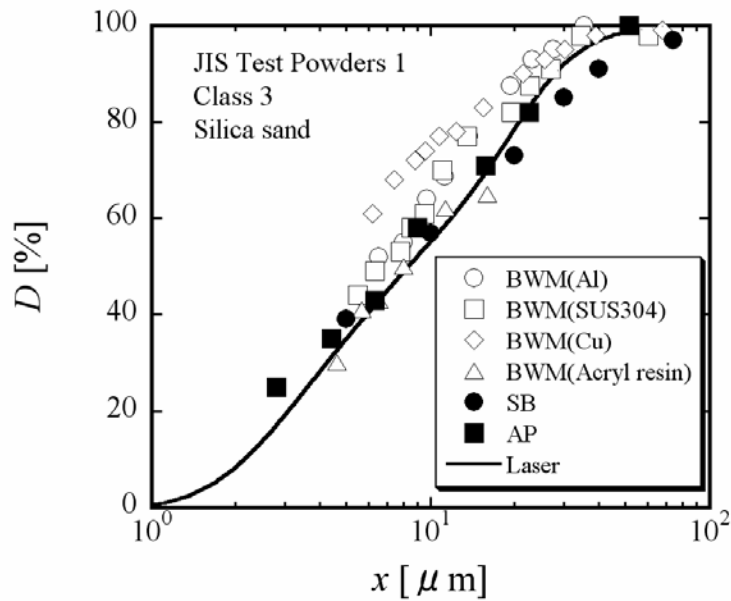


Fig.4-7 Particle size distribution (Silica sand, Non-spherical, JIS Test Powders 1, Class 3)  
 BWM=Buoyancy weighing-bar method, SB=Sedimentation balance method,  
 AP=Andreasen pipette method

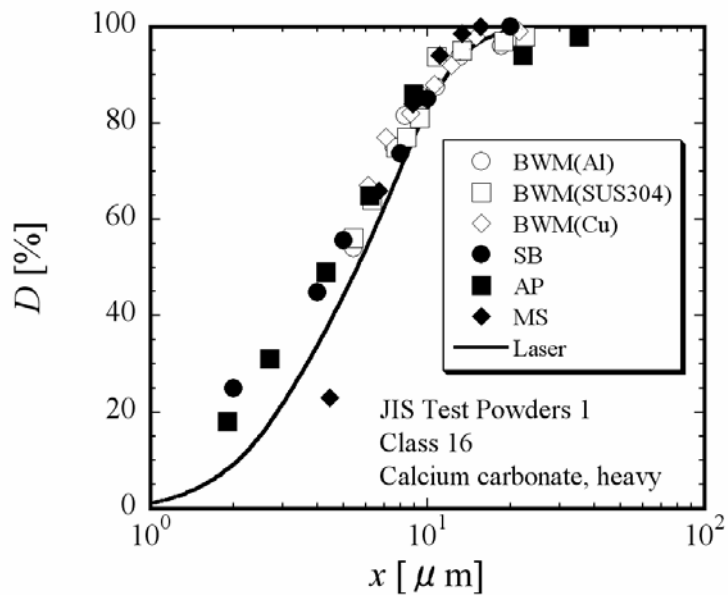


Fig.4-8 Particle size distribution (Calcium carbonate (heavy), Non-spherical, JIS Test Powders 1, Class 16)  
 BWM=Buoyancy weighing-bar method, SB=Sedimentation balance method,  
 AP=Andreasen pipette method, MS=Microscope method

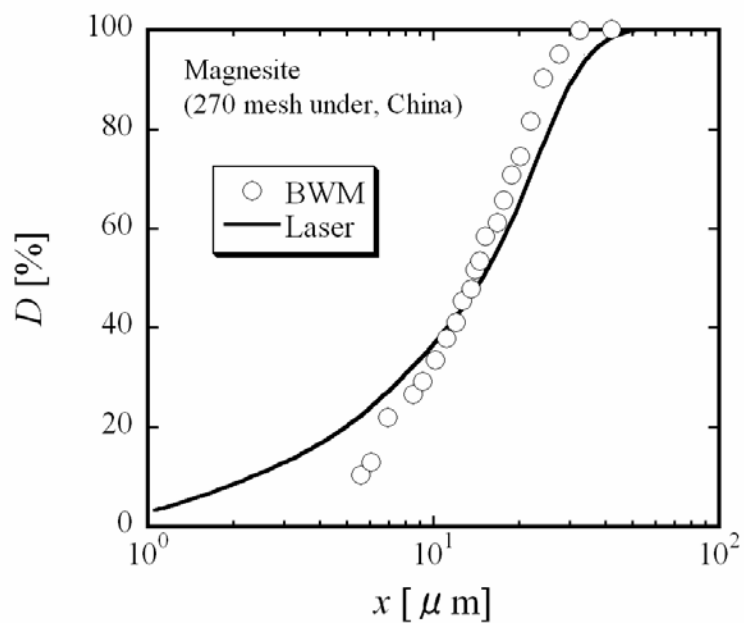


图 4-9 Particle size distribution of magnesite (China)  
BWM=Buoyancy weighing-bar method

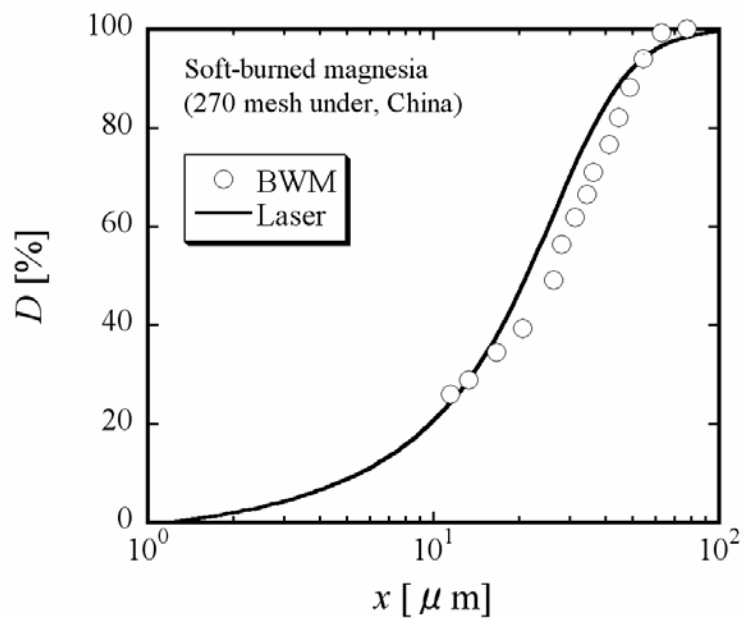


图 4-10 Particle size distribution (Soft-burned magnesia, China)  
BWM=Buoyancy weighing-bar method

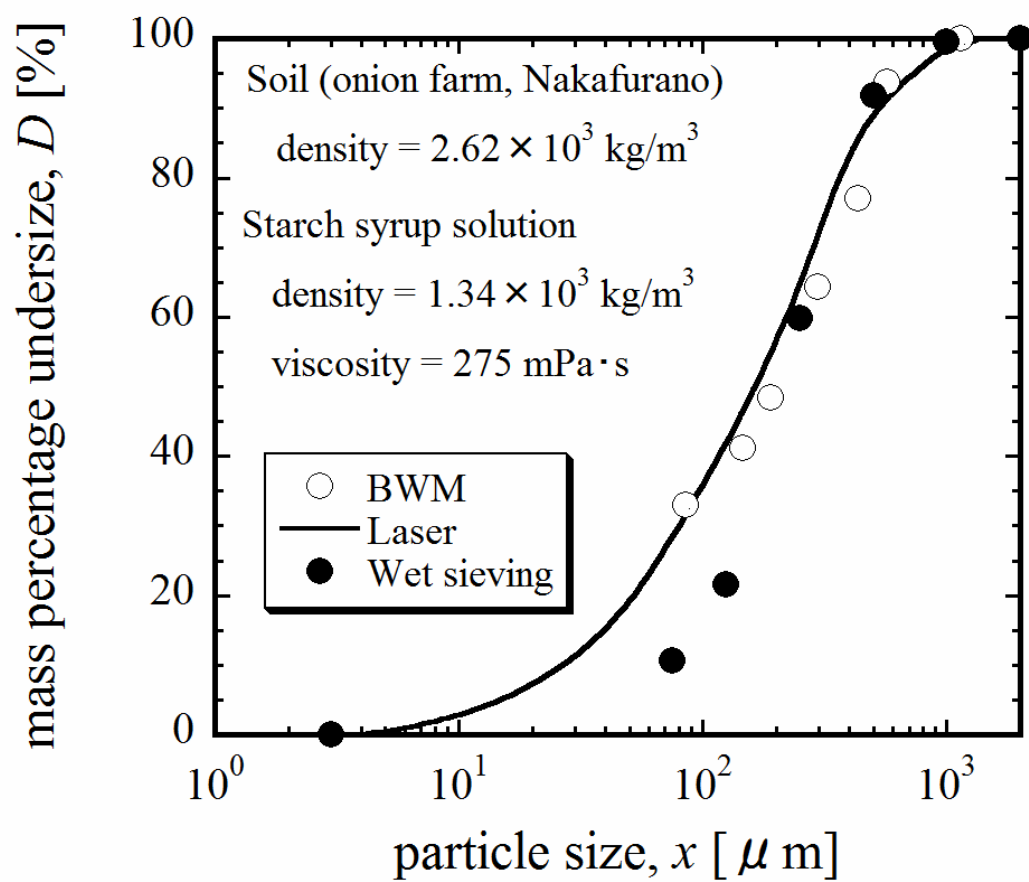


図 4-11 Particle size distribution (Soil, onion farm, Nakafurano)  
BWM=Buoyancy weighing-bar method

## 第 5 章 地下かんがいシステムを備えた圃場の土壌特性

### 1. 緒言

第 3 章では，富良野盆地地区にある一般的なかんがい排水圃場について検討を行った．一方で，今後，富良野盆地地区には地下かんがいシステムが導入される．このシステムを導入することによって圃場の土壌特性が変化すると予想されるが，検討した例は見あたらない．

そこで，本章では，富良野盆地にある一般的なかんがい排水施設を備えた圃場と既設暗渠利用型の地下かんがいシステムを備えた圃場の違いを検討するため，pH(H<sub>2</sub>O)，EC，土壌硬度，強熱減量，硫酸イオン含有量の深さ方向分布を測定した．また，十勝岳泥流との関連についても考察を加えた．

### 2. 水田圃場

#### 2.1 調査方法

図 5.2-1 に開水路型用水路に接続された地下かんがいシステムの概略図を示す．試験圃場として上富良野町が十勝岳泥流の影響調査を行った地先(上富良野町，1995)の中から，中富良野町に位置する既設暗渠利用型の地下かんがいシステムを備えた水田 1 枚，一般的なかんがい排水設備を備えた水田 1 枚を選定した．調査は 2005 年に行い，代掻き前の 4 月中旬と稲刈り後の 11 月上旬の 2 回行った．両水田とも調査年の栽培作物は水稻である．

中富良野町報徳地区に位置する既設暗渠利用型の地下かんがいシステムを備えた水田(以降，「水田 A」とする)の俯瞰図を図 5.2-2 に示す．地力保全基本調査成績書(北海道中央農業試験場，1978)によれば水田 A は 0.50 m 以下に重埴土が存在する鈴和統と 0.10 m 以下に低位泥炭土が存在する中富良野統にまたがる水田である．水田の大きさは畦(図中太線)で囲まれた 170 m×33 m である．深さ 0.70–0.90 m の位置に 11 m 間隔で 3 本の暗渠管(図中破線)が設置されており，入口側および出口側で 3 本の暗渠管がつながれている．用水は開水路型管渠であるトラフで圃場まで導かれている．図中●の位置にあるトラフ側面に設けられたシャッターを開けることでトラフを流れる用水の一部が集中管理孔(□)を通して圃場地下に導かれる．サンプリングポイントは図中○で示した暗渠直上(U) 2 箇所とその中間地点(M) 1 箇所の計 3 点とした．中富良野町共同地区に位置する一般的なかんがい排水施設を備えた水田(以降，「水田 B」とする)の俯瞰図を図 5.2-3 に示す．地力保全基本調査成績書



(1978)によれば共同統に分類され、水田の 0.45 m 以下は低位泥炭土である。圃場の大きさは畦(図中太線)で囲まれた 170 m×70 m で、深さ 0.7-0.9 m の位置におよそ 10 m 間隔で 7 本の排水用暗渠管(図中破線)が設置されている。用水は閉水路型管渠で圃場まで導かれ、図中●の位置にあるバルブを開くことで地表から供給される。サンプリングポイントは対角法で決定し、図中○で示す 5 点とした。

図 5.2-4 に示すように各ポイントで深さ 0.45 m まで 0.15 m 間隔で約 1 kg の土壌試料を採取した。山中式土壌硬度計で各土層の土壌硬度を測定した後、埋め戻した。土質試験方法(土質工学会, 1983)および土壌分析法(日本土壌協会, 2002)に従って採取した土壌の pH(H<sub>2</sub>O), EC, 水分, 強熱減量を測定した。pH(H<sub>2</sub>O)測定には pH 計(PH5011A, CUSTOM 製), EC 測定には導電率計(CD5021A, CUSTOM 製), 水分測定にはドライオーブン(ANS-1125, ISUZU 製), 強熱減量測定にはマッフル炉(FM27, Yamato 製)を用いた。硫酸イオン含有率を測定するため、土層ごとに土壌試料 10 g と水 50 g を混合し、それを遠心分離(3000 rpm, 15 分)した上澄み液を得た。上澄み液中の硫酸イオン濃度の測定には、イオンクロマトグラフ用高性能充てんカラム(Shim-pack, IC-A1)を装着した高速液体クロマトグラフィー HIC-6A(島津製作所製)を用いた。溶離液としてフタル酸(特級, 和光純薬工業製)とトリス(ヒドロキシメチル)アミノメタン(特級, 和光純薬工業製)の混合溶液を用い、濃度はそれぞれ 2.5 mmol・l<sup>-1</sup>, 2.4 mmol・l<sup>-1</sup> とした。カラム温度は 313 K, 溶離液流量は 1.5 ml・min<sup>-1</sup> とした。検出器には電気伝導度検出器(CDD-6A, 島津製作所製)を用いた。検量線作成のための硫酸イオン標準溶液は硫酸ナトリウム(無水物, 特級, 関東化学製)とイオン交換水を用いて調製した。濃度の異なる硫酸イオン標準溶液を高速液体クロマトグラフィーで分析し、得られたピーク面積と硫酸イオン濃度から検量線を事前に作成した。上澄み液を高速液体クロマトグラフィーで分析し、検量線から硫酸イオン濃度を求めた。硫酸イオン濃度は次式を用いて乾燥土壌 100g あたりの硫酸イオン含有量に換算した。

$$C = a \frac{100W + SM}{S(100 - M)} \quad (5-1)$$

ここで、 $C$  は乾燥土壌 100g あたりの吸着量[mg・100g-dry soil<sup>-1</sup>],  $a$  は硫酸イオン濃度の測定値[mg・kg<sup>-1</sup>],  $S$  は試料土壌質量[g],  $W$  は水添加量[g],  $M$  は土壌水分[g-water・100g-wet soil<sup>-1</sup>]である。水田 A の場合、暗渠直上(U) 2 箇所 の測定値の算術平均値を求めた。また、水田 B の場合は 5 箇所 の測定値の算術平均値を求めた。

## 2.2 調査結果と考察

### 2.2.1 pH(H<sub>2</sub>O)

図 5.2-5 に春期(a), 秋期(b)の pH(H<sub>2</sub>O)の測定結果を示す. 春秋とも, 暗渠直上と暗渠間の土壤に顕著な違いは見られなかった. 春期では, 水田 A の pH(H<sub>2</sub>O)は 6.5 程度でほぼ一様であった. 一方, 水田 B では深さ 0.30 m まで pH(H<sub>2</sub>O)が 6.3 程度であったが, 深さ 0.30–0.45 m では pH(H<sub>2</sub>O)が 6.1 と若干酸性になっている. これは水田 A の土壤が泥炭もしくは十勝岳泥流に由来する物質の影響を受けているためと考えられる. 秋期では, 水田 A, B とも pH(H<sub>2</sub>O)が 6.0 前後まで低下している. 春秋とも, 水田 A の pH(H<sub>2</sub>O)は深くなってもほぼ同じ, もしくは高くなる傾向が見られる. 一方, 水田 B ではわずかではあるが pH(H<sub>2</sub>O)の深さ方向分布に違いが見られ, 深くなると pH(H<sub>2</sub>O)が低くなる傾向が見られた. 両水田の結果を比較すると, 水田 A, B ともほぼ同じである. そのため, 地下かんがいシステムによる地下からの給水と地表から行う給水は, pH(H<sub>2</sub>O)分布にほとんど影響しないと考えられる. なお, 北海道施肥ガイド(2002)によれば非湛水期の水田土壤の pH(H<sub>2</sub>O)範囲は 5.5–6.0 とされている. 土壤の pH(H<sub>2</sub>O)は営農に支障ない値であると考えられる. なお, 上富良野町が行った十勝岳泥流地帯の調査で, 水田 A, B 付近の調査も行われている(上富良野町, 1995). 作土層の pH(H<sub>2</sub>O)はそれぞれ 5.61, 5.56 と報告されており, 本研究で得られた pH(H<sub>2</sub>O)よりもやや酸性側にある. 約 10 年の間で十勝岳泥流に由来する酸性物質が減少していると考えられることもできるが, 土壤の緩衝作用によるものとも考えられるため, 今後とも検討を継続する必要がある.

### 2.2.2 EC

水野ら(1992)は十勝岳泥流地帯では質量比 5 倍の水で抽出された水溶性イオウと EC の関係を検討し, 両者間に高い正の相関があることを報告している. そのため, EC を測定することによって十勝岳泥流に由来する物質の影響を間接的に知ることができると考えられる. 図 5.2-6 に春期(a), 秋期(b)の EC の測定結果を示す. EC の値は春期で 3–4 mS/m, 秋期で 2–4 mS/m 程度であった. 水田 A は春秋とも暗渠直上よりも暗渠間の土壤の EC が高い. これは用水の給排水によって暗渠直上の土壤から肥料成分などの電解質成分が流失しやすかったためと考えられる. 一方, 深さ方向分布はほぼ一様と見なすことができる. また, 春期と秋期の EC 値を比較するとほぼ同じである. 春期の試料採取後に施肥が行われているため, 測定を行っていない夏期は EC の値が春期よりも大きくなっていたと考えられる. 春期と秋期で EC の値がほぼ同じであった理由として,

施肥された肥料によって EC が上昇したものの、栽培作物による電解質栄養分の吸収や降水等による流出が考えられる。春期を基準に考えると、過剰施肥であれば秋期に蓄積し、施肥不足であれば秋期に減少すると予想される。現時点では過不足ない適切な施肥が施されていたと判断できる。また、水田 A と水田 B で顕著な差は見られなかった。そのため、少なくとも今回調査した水田に関して、給水方法の違いは電解質成分の深さ方向分布に大きな影響をおよぼしていないことがわかった。なお、上富良野町が行った十勝岳泥流地帯の調査(上富良野町, 1995)で、水田 A、水田 B 付近の EC はそれぞれ  $4 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $12 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$  と報告されている。本研究で得られた EC の値は水田 A ではほぼ同じ、水田 B では 1/3 程度である。特に水田 B のデータは、十勝岳泥流に由来する物質から溶出する電解質成分が減少してきていることを示唆しているものと思われる。しかし、施肥量などの営農技術が調査当時と異なっていることも考えられるため、さらなる調査を継続的に行う必要があると思われる。

### 2.2.3 土壌硬度

図 5.2-7 に春期(a)、秋期(b)の土壌硬度測定結果を示す。水田 A は春秋とも、暗渠間(M)のほうが直上(U)よりも土壌硬度が大きい傾向にある。これは暗渠直上の土壌は用水の給排水によって粒子間の空間が大きくなっているためと考えられる。春期では両圃場とも地表から  $-0.15 \sim -0.30 \text{ m}$  の土壌硬度が大きくなっている。この深さで耕盤が形成されていたと考えられる。一方、秋期は深くなるほど土壌硬度が大きくなる傾向にある。特に水田 B は地表から  $0.30 \text{ m}$  までの土層で土壌硬度の値が  $6 \text{ mm}$  以下と小さく、それよりも下の土層では土壌硬度が  $19 \text{ mm}$  であった。この理由については現時点で不明であるが、営農期に入れた農業機械などによって深部の土壌硬度が大きくなったと考えられる。鋤床層のち密度として  $15\text{--}20 \text{ mm}$  が適するとされている(北海道農政部, 2002)。水田 A, B ともこの値よりも土壌硬度がやや小さい。土壌採取時に泥炭に由来すると見られる繊維状の物質が確認されていたことから、耕耘等によって下層にある泥炭が持ち上げられ、作土層に泥炭が混入していたため土壌硬度が小さくなっていたと考えられる。

### 2.2.4 強熱減量

土壌中の有機成分を検討する場合、腐植量を測定する必要があるが、腐植量の測定には数種の試薬やガラス器具を使用し、熟練を要する。腐植と強熱減量では意味が異なっていることを認識しているが、強熱減量の測定は比較的容易である。本調査では土質試験方法(土質工学会, 1983)で用いられている強熱減量で土壌中の有機成分

量を検討した．図 5.2-8 に春期(a)，秋期(b)の強熱減量測定結果を示す．水田 A では，春期，秋期ともサンプリング位置による違いは見られなかった．絶対値を比較すると春期にくらべて秋期の方が若干増加している．これは春期の試料採取後に行われた耕耘による泥炭の混入や堆肥等の有機資材の影響と考えられる．また，強熱減量の深さ方向分布がほぼ一様であった．一方，水田 B の強熱減量は，春期に比べて秋期の方が減少した．水田 B における強熱減量は春期に深さ方向分布があるものの，秋期では深さ方向分布がほぼ一様であった．強熱減量の絶対値を比較すると，水田 A にくらべて水田 B で強熱減量の値が大きい．これは下層部にあった泥炭が耕耘等によって作土層まで持ち上げられた量が異なっていたためと考えられる．

#### 2.2.5 硫酸イオン

硫酸イオンについては一般的な土壌診断項目として扱われていない．しかし，富良野盆地には十勝岳泥流地帯が含まれており，上富良野町では  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ ，EC，交換性塩基などの項目に加えて全イオンについても調査している(上富良野町，1995)．また，硫酸イオンは硫酸還元菌の作用により硫化水素になり(大峽ら，2004)，秋落ちやそれに類する現象により作物の生育に悪影響をおよぼす恐れがある．そこで本研究では硫黄の一形態である硫酸イオンの含有率測定を項目に加えた．図 5.2-9 に春期(a)，秋期(b)の硫酸イオン含有量の測定結果を示す．春期および秋期において，水田 A の硫酸イオン含有量の深さ方向分布はほとんど一様であった．しかし，春期に比べて秋期の方が高い値となっている．一方，水田 B も深さ方向分布および春期と秋期の違いは水田 A の場合と同様の傾向であった．しかし，水田 A と水田 B における硫酸イオン含有量の絶対値を比較すると，水田 B の方がやや高い値であった．これは給水方法の違いによるものと考えられる．すなわち，地下かんがいによって圃場に貯えられた用水が十勝岳泥流で運ばれた物質に由来する硫酸イオンを上昇させ，その結果，土壌中の硫酸イオン含有量を若干増加させたと考えられる．しかし，図 5.2-5 に示したように水田 A の  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  は 6 程度である．現時点で，十勝岳泥流等に由来する物質から生成した硫酸イオンなどが用水とともに土壌中を上昇することによる酸性化等の悪影響は起こっていないことがわかった．

上富良野町が行った十勝岳泥流地帯の調査(上富良野町，1995)で，水田 A 付近の全イオンは 0.25%，水田 B 付近の全イオンは 0.14% と報告されている．水野ら(1992)は十勝岳泥流の影響を受けた富良野川沿いに位置する圃場で調査した土壌中の全イオンと水溶性イ

イオウを示している．水溶性イオウは質量比 5 倍の水で抽出した硫黄分であり，本研究の硫酸イオン抽出方法とほぼ同じである．そこで，水野ら(1992)のデータから全イオウに対する水溶性イオウの比率を求めると 0.0013–0.016 であった．この比率を用いて水田 A，B 付近の全イオウのデータ(上富良野町，1995)から水溶性イオウ含有率を推算すると，水田 A 付近は  $0.98\text{--}12\text{ mg}\cdot 100\text{g-dry soil}^{-1}$ ，水田 B 付近は  $0.55\text{--}6.7\text{ mg}\cdot 100\text{g-dry soil}^{-1}$  となる．これらの値は本研究で得られた春期の硫酸イオン含有率にくらべて 1 桁程度小さい．前述したように EC は同等もしくは減少しており，十勝岳泥流の成分から流出している電解質の総量としてはほぼ同じ，もしくは減少しているものの硫酸イオンは増加していると推測することもできる．しかし，EC の場合と同様，施肥量などの営農技術が調査当時と異なっていることも考えられるため，さらなる調査を継続的に行う必要があると思われる．

### 3. 畑地圃場

#### 3.1 調査方法

試験圃場は中富良野町に位置し，2005 年度の栽培作物は玉葱である．図 5.3-1 に既設暗渠利用型の地下かんがいシステムを備えた平地圃場（以降，「圃場 A」とする）の概略を示す．地力保全基本調査成績書(1978)によれば圃場 A は中富良野統に分類され，圃場 0.10 m 以下は低位泥炭土である．地下かんがい圃場の範囲は太線と一点鎖線で囲まれた  $170\text{ m}\times 60\text{ m}$  である．深さ 0.70–0.90 m の位置に 11 m 間隔で 6 本の暗渠管(図中破線)が設置されており，入口側では 6 本全てが，出口側では 3 本ずつつながれている．用水は閉水路型管渠で圃場まで導かれ，図中●の位置にあるバルブを開くことで集中管理閘(□)を通して圃場地下に導かれる．サンプリングポイントは 2,3 本目の暗渠直上とその中間地点，4,5 本目の暗渠直上とその中間地点の計 6 点とし，図中に○で示した．図 5.3-2 に一般的なかんがい排水設備を備えた平地圃場(以降，「圃場 B」とする)の概略を示す．地力保全基本調査成績書(1978)によれば共同統に分類され，圃場 0.45 m 以下は低位泥炭土である．圃場の大きさは太線で囲まれた  $170\text{ m}\times 70\text{ m}$  で，深さ 0.7–0.9 m の位置に約 10 m 間隔で 7 本の排水用暗渠管(図中破線)が設置されている．用水は閉水路型管渠で圃場まで導かれ，図中●の位置にあるバルブを開くことで地表から供給される．サンプリングポイントは対角法で決定し，図中○で示す 5 点とした．図 5.3-3 に丘陵部に位置する圃場(以降，「圃場 C」とする)の概略を示す．地力保全基本調査成績書(中富良野町)には分類が

記載されていない開墾地であり，0.30 m 以下は硬いため掘りにくい．丘陵部では畦等が存在しないため圃場には明確な境界がない．圃場全体で多種にわたる作物の栽培を行う予定であったため，玉葱栽培を予定していた範囲を対象圃場とし，太線および一点鎖線で囲まれた 80×40 m の範囲とした．用水は近くにある湧き水等を利用しており，暗渠管による排水機能はない．サンプリングポイントは対角法で決定し，○で示す 5 点とした．調査は 2005 年に行い，植えつけ前の 4 月中旬，玉葱栽培中の 8 月上旬，収穫後の 11 月上旬の 3 回行った．水田の場合と同様，各ポイントで深さ 0.45 m まで 0.15 m 間隔で土壌試料を約 500 g ずつ採取した．山中式土壌硬度計で各層の土壌硬度を測定した後，埋め戻した．採取した土壌の pH(H<sub>2</sub>O)，EC，水分，強熱減量は土質試験方法に従って分析した．pH(H<sub>2</sub>O)の測定には pH 計(PH5011A，CUSTOM 製)，EC の測定には導電率計(CD5021A，CUSTOM 製)，水分測定にはドライオーブン(ANS-1125，ISUZU 製)，強熱減量測定にはマッフル炉(FM27，Yamato 製)を用いた．

試料土壌 10 g と水 50g を混合し，それを遠心分離(3000rpm，15 分)した上澄み液を得た．この上澄み液を用いてイオンクロマトグラフィー(島津製)で硫酸イオン濃度を測定した．なお，イオンクロマトグラフ用高性能充填カラム(Shim-pack，IC-A1)を装着した高速液体クロマトグラフィーHIC-6A(島津製作所製)を用いた．溶離液の調製にはフタル酸(特級，和光純薬製)とトリス(ヒドロキシメチル)アミノメタン(特級，和光純薬製)の混合溶液を用い，濃度はそれぞれ 2.5 mmol・l<sup>-1</sup>，2.4 mmol・l<sup>-1</sup>とした．カラムオーブン温度は 313 K，溶離液流量は 1.5 ml・min<sup>-1</sup>とした．検出器には電気伝導度検出器(CDD-6A，島津製作所製)を用いた．硫酸イオンは，乾燥土壌 100g あたりの質量に換算した．圃場 A の場合，暗渠直上(U)4 箇所と暗渠間(M)2 箇所の測定値についてそれぞれ算術平均値を求めた．また，圃場 B および圃場 C の場合は 5 箇所の測定値の算術平均値を求めた．

## 3.2 調査結果と考察

### 3.2.1 pH(H<sub>2</sub>O)

富良野盆地地区は下層に泥炭があるため，営農を行う上で pH(H<sub>2</sub>O)は重要な因子である．図 5.3-4 に春，夏，秋期の pH(H<sub>2</sub>O)の測定結果を示す．春期の B 圃場の 0.00～-0.30 m 及び C 圃場の 0.00～-0.45 m で pH(H<sub>2</sub>O)が 6.5 以上であった．各圃場とも夏期に pH(H<sub>2</sub>O)は下がり秋までに若干戻る傾向が見られたが，地下かんがいシステムを備えた A 圃場では -0.30～-0.45 m では低いままであ

った．夏期に  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  が下がる理由としては，作物や堆肥由来の有機酸，肥料に含まれる硝酸イオンや硫酸イオン等の影響によるものと考えられる．また，A，B 圃場の土壌の深いところで  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  が低いのは，これら圃場の作土層の下が酸性の強い低位泥炭土であり，泥炭中の酸性の水分が暗渠の疎水材や空間の多い土壌内を毛管現象等によって浸出し影響しているものと考えられる．前述した  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  が 6.5 以外の測定値は，北海道施肥ガイド(2002)での野菜畑土壌の  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  適正值 6.0－6.5(施肥前)の範囲内であり営農には支障はないことがわかった．また，A，B 圃場の測定値の傾向は前報の水田圃場と同様であった．

### 3.2.2 EC

図 5.3-5 に春，夏，秋期の EC の測定結果を示す．春，秋期の EC は 5－9 mS/m 程度であり，夏期は 11－20 mS/m と高くなった．施肥ガイドでの玉葱土壌の EC の基準は 60 mS/m (0.6 mS/cm) 以下であり問題はない．地下かんがいシステムの備わった A 圃場の－0.30～－0.45 m で EC が若干高い値を示した．この点については，栄養塩が雨水等で土壌下部に流下しこれが蓄積されたと考えられるが，後述する土壌硬度を見ると－0.15～－0.30 m で高くなっており，この層で透水性が悪くなっていれば栄養塩が蓄積され EC 値が高くなるはずである．測定値はその下の層のほうが EC が高い．前述した第 4 章において土壌粒径と栄養塩吸着量との関係を実験的に検討し，土壌粒子が小さい方が  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  が上がり電解質を吸着しやすいことを示した．このことから，地下かんがい圃場においても－0.30～－0.45 m の方がそれより上の土壌よりも粒子が小さく栄養塩の吸着量が多くなり EC 値が高くなったと推測される．今後，この関係については透水性等の測定を行い更なる検討が必要と考える．測定された EC 値は水田圃場に比べ約 2 倍の値となっている．これはおそらく水田での湛水による除塩作用 (EC の溶出，流失) がなかったためと思われる．

### 3.2.3 土壌硬度

図 5.3-6 に春，夏，秋期の土壌硬度の測定結果を示す．C 圃場の－0.30～－0.45 m で 20 mm を超えているが，それ以外は全て 20 mm 以内であった．上川南部の地帯区分は低地土であり，野菜畑土壌の心土のち密度の基準値は 18－20 mm，耕盤層の判定値は 20 mm 以上となっている (施肥ガイド)．上記 C 圃場の深い層を除いて基準内である．C 圃場の－0.45 m より下は岩盤状の地山で耕作は難しい．また，A，B 圃場の－0.15～－0.30 m で土壌硬度が 15－18 mm となっており，耕盤層的な特徴を示している．これは営農期に圃場内に



入れたプラウやロータリー等による踏圧で圧密されたものと思われる．水田圃場の測定値ともほぼ同様であった．これらの圃場は中富良野土壌統に属し（土壌生産性分級図並に土壌区分図，北海道中央農業試験場），作土層の下は低位泥炭土である．もともと水田として永年にわたり土地改良が行われ，作土層についても近隣の粘性土を客土して現在に至っている．通常，耕盤層は排水性の悪化による作物の生育不良や農作業の停滞を招くが，この地域においては泥炭土の地耐力不足を補完する上で必要である．ただし，土壌硬度が今後 20 mm を超えるようであれば，地耐力を確保しつつ心土破碎等による排水性の向上を図る必要があると考える．

#### 3.2.4 強熱減量

図 5.3-7 に春，夏，秋期の強熱減量測定結果を示す．A，B 圃場では深くなるほど多くなった．これは，過去の水稲根株等や野菜等の残滓，堆肥或いは作土層下の泥炭土が深耕によって鋤きこまれたものとする．C 圃場は作土層下が岩盤であるため，A，B 圃場に比べ泥炭がないぶん測定値が少なくなったと思われる．A 圃場の  $-0.30 \sim -0.45$  m で測定値が季節ごとにバラついた．この深さにおける C 圃場の測定値を泥炭に起因しない強熱減量（平均約 7 g）と考えれば，A 圃場の泥炭に起因する強熱減量は約 11–26 g（測定値から 7 g 差し引いた値）となる．つまり，土壌の 1–3 割弱が泥炭であるといえる．B 圃場についても A 圃場よりは少ないが深い層で泥炭が多く含まれている傾向を示している．A，B 圃場のような平坦地の土壌は，耕耘などによって鋤きこまれた泥炭量が多くなる．そのため，強熱減量は深くなるほど多くなり，その分布も一様ではなくなることがわかった．A，B 圃場と水田圃場を比較すると傾向は似ているが A，B 圃場の方が強熱減量が多かった．これは前述したように強熱減量の絶対値の違いは地下土質の違いであると思われる．

#### 3.2.5 硫酸イオン

図 5.3-8 に春，夏，秋期の硫酸イオン濃度測定結果を示す．水田の場合と同様，硫酸イオンについては土壌基準として特別なものはなく，一般的な土壌診断項目にも扱われていない．従って，ここでは硫酸イオンと土壌の他の測定値との関係を検討した．A 圃場では B，C 圃場に比べ硫酸イオンが多く，また，土壌が深くなるほど多くなった．B 圃場は春，夏期は A 圃場に似た傾向を示すが，秋期には C 圃場と同等まで少なくなっている．C 圃場では春期に少なく夏期以降若干増えるが大きな変動ではない．C 圃場での硫酸イオンの変動は硫安や過石等の肥料に含まれている硫酸イオンが残留したものと思われる．A，B 圃場の作土層は土壌硬度でも触れたように

近隣の土取り場（中富良野では昭和 26 年から軌道客土，昭和 41 年からトラック客土が行われている．土取り場は主に中富良野町鹿討部落西部の粘性土山）から客土されており，C 圃場の土壌と粒径分布等の物理性が非常に似ている．つまり，元の土壌に含まれる硫酸イオンは量的には各圃場とも同程度と思われる．そうになると， $-0.30 \sim -0.45$  m において A，B 圃場と C 圃場とでの測定値を大きく変える因子は，作土層下の泥炭土壌の有無以外に考えられない．作土層下部に泥炭がある土壌では，泥炭土壌に近いところで硫酸イオンを含んだ水分が毛管現象等によって浸出し，測定値が高くなったと考えられる．一般的に泥炭土壌には酸化鉄が多いが，この地域では硫化鉄が多い（富良野地区土地改良区史）といわれている．これは，富良野盆地が十勝岳の南西の山すそに位置し，硫黄分（大正期に硫黄鉱山があった，平山鉱業所）の多い山麓を源流とする河川が泥炭地に流入し，硫化鉄や硫酸イオンとして蓄積されたことによるものと思われる．硫酸イオンの深さ方向の分布と  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  の深さ方向の分布を比較すると，その挙動が非常に良く相関している．このことから，硫酸イオン濃度が  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  に大きく影響している，つまり，作土層下の土壌が  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  に大きく影響していることが分かった．しかし， $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  が適正值の範囲内であることから，水田圃場同様，硫酸イオンによる土壌の酸性化等の悪影響は起こっていないといえる．

#### 4. 結言

富良野盆地にある一般的ながんがい排水施設を備えた圃場と既設暗渠利用型の地下かんがいシステムを備えた圃場の違いを検討するため，水田および畑地圃場について土壌の  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ ，EC，硬度，強熱減量，硫酸イオン含有量の深さ方向分布を測定した．その結果，次の知見が得られた．

- (1) 水田の土壌  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ ，EC の深さ方向分布は，一般的ながんがい排水施設を備えた水田と地下かんがいシステムを備えた水田で大きな違いは見られなかった．
- (2) 一般的ながんがい排水施設を備えた水田と地下かんがいシステムを備えた水田とも，強熱減量の深さ方向分布はほぼ一様で，ほぼ同じであった．
- (3) 一般的ながんがい排水施設を備えた水田の深さ方向硫酸イオン含有量分布は春期，秋期ともほぼ一様であった．地下かんがいシステムを備えた水田は秋期に硫酸イオン含有量が高くなっていたが，土壌  $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$  は適正とされる範囲内であった．

- (4) 土壤 pH( $\text{H}_2\text{O}$ )は平坦地圃場では大きな違いはないが、丘陵部圃場では高い値となった。平坦地圃場は水田圃場と同様の傾向を示した。
- (5) EC は夏期に施肥による影響で高くなったと思われるが、基準値の範囲内で問題はなかった。水田圃場に比べ約 2 倍であったが、これは湛水による除塩作用を受けなかったためと思われる。
- (6) 丘陵部（C 圃場）の深い層は岩盤で硬く耕作は難しいが、平坦地では山中式硬度で 18 mm 以下であり、耕作に適する。水田圃場ともよく似ていた。
- (7) 強熱減量，硫酸イオン並びに pH( $\text{H}_2\text{O}$ )は作土層下の影響を大きく受けることが分かった。

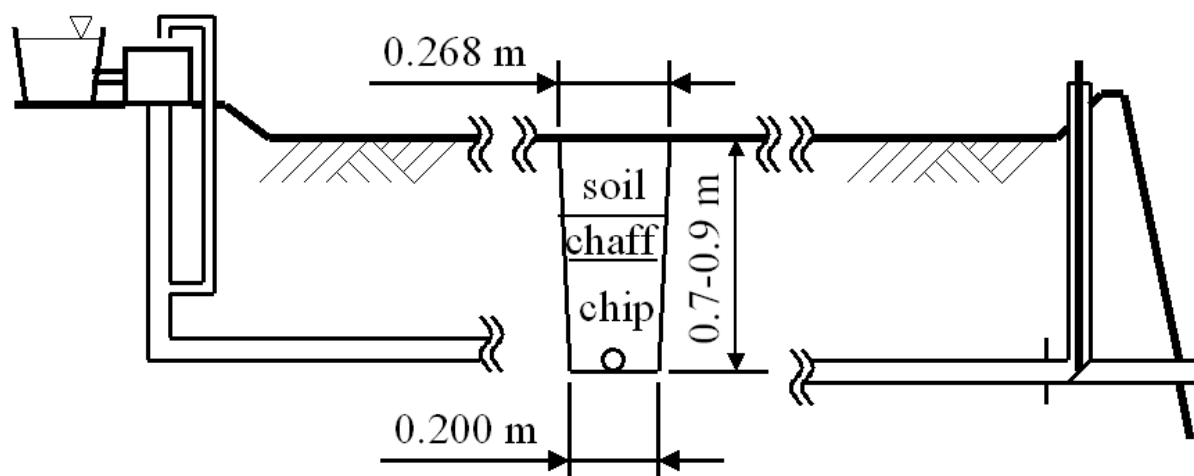


図 5.2-1 既設暗渠利用型地下かんがいシステム(開水路型)

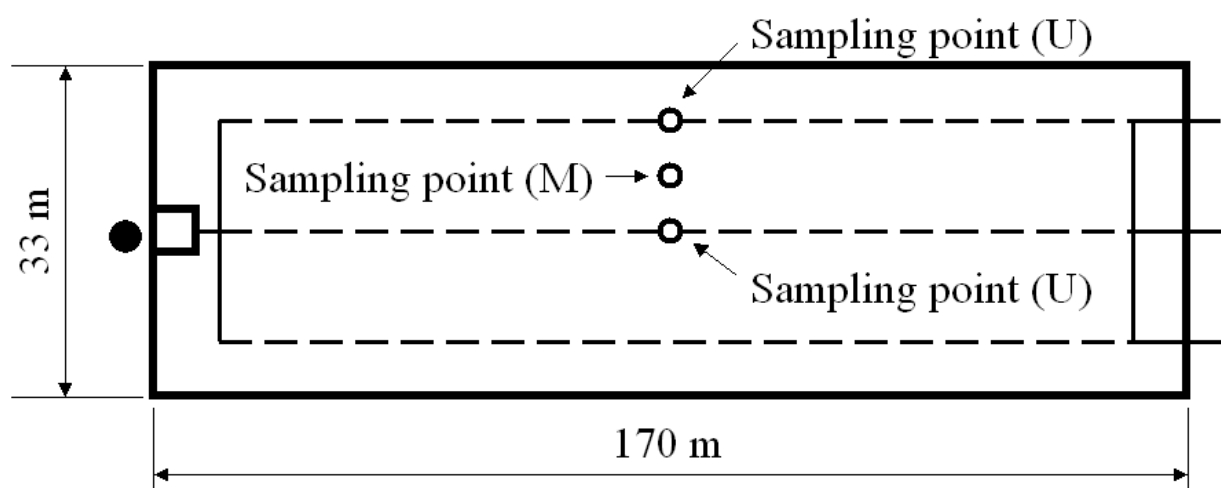


図 5.2-2 地下かんがいシステムを備えた水田 A

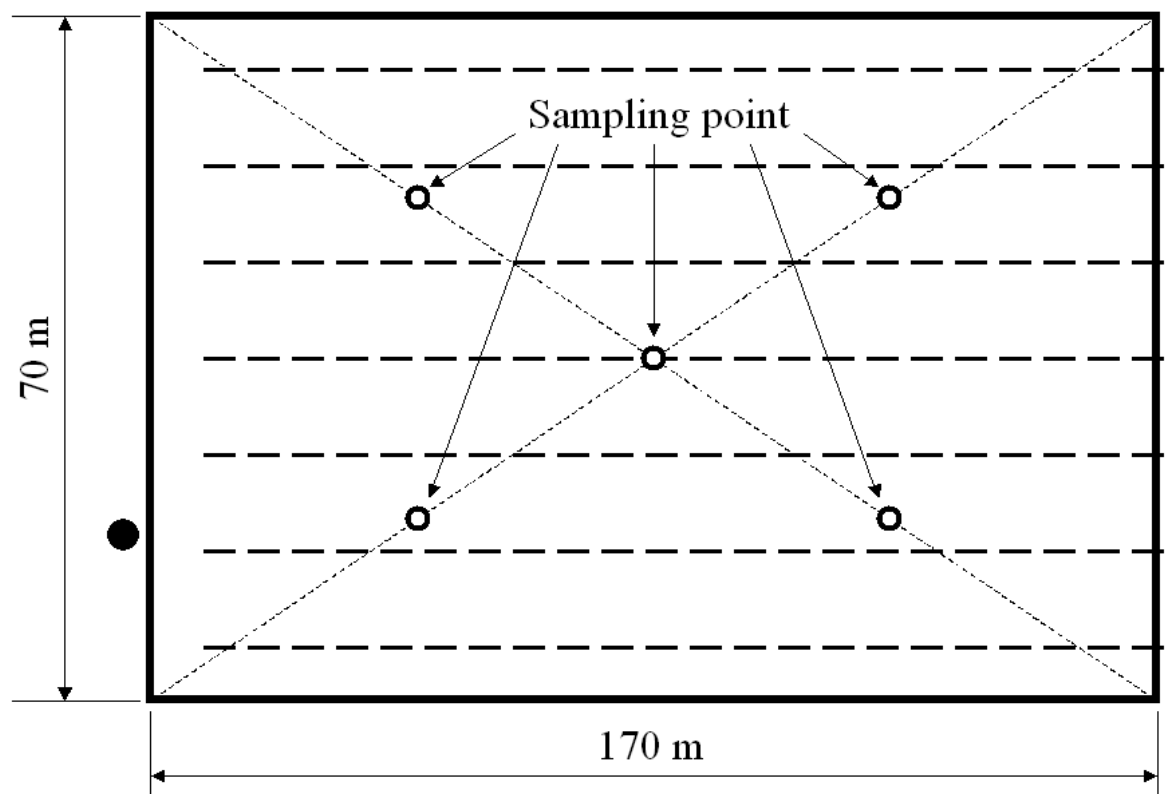


図 5.2-3 がんがい排水施設を備えた水田 B

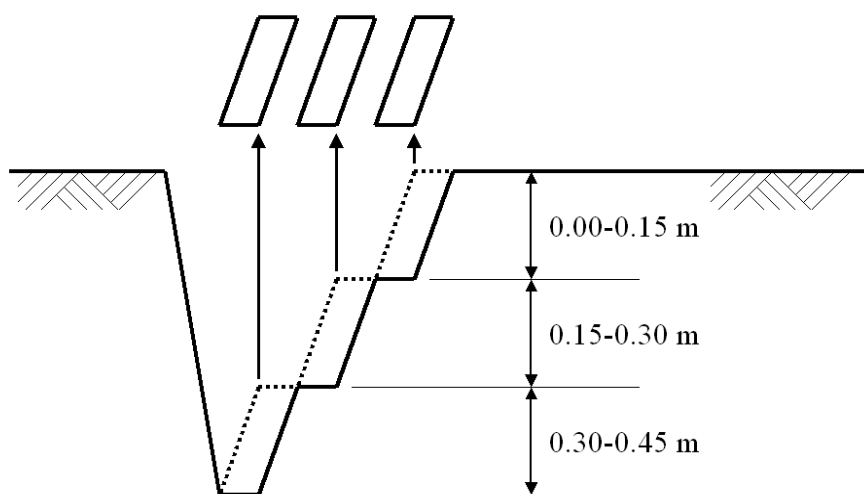
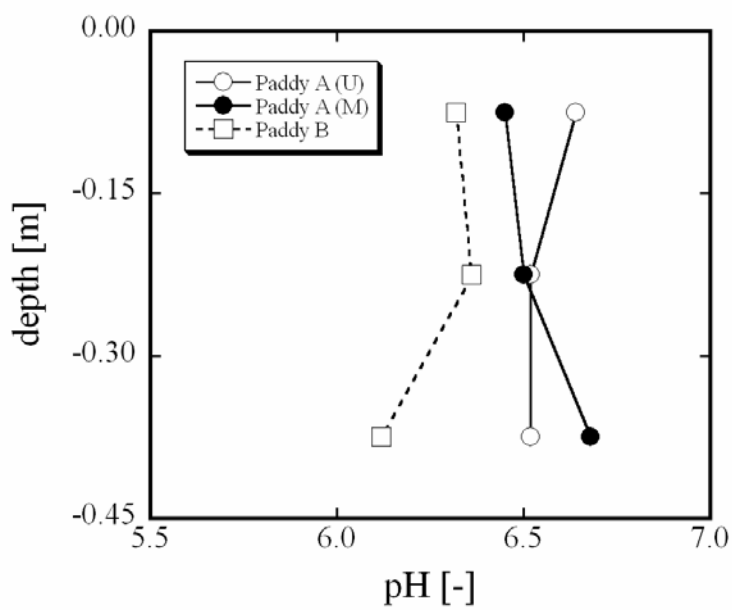
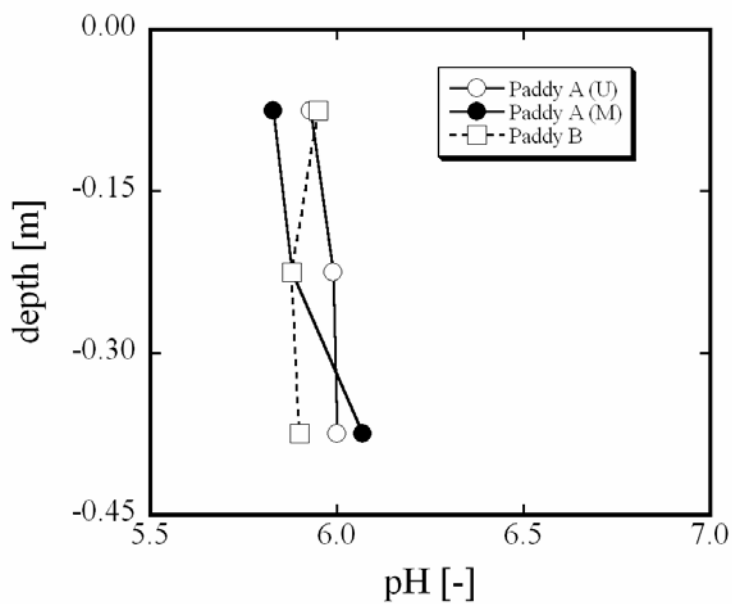


図 5.2-4 土壌サンプリング方法

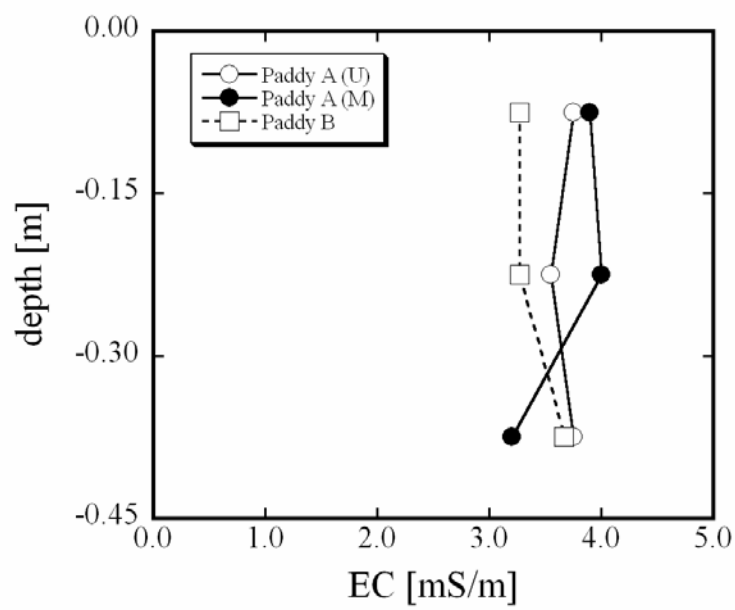


(a) 春期

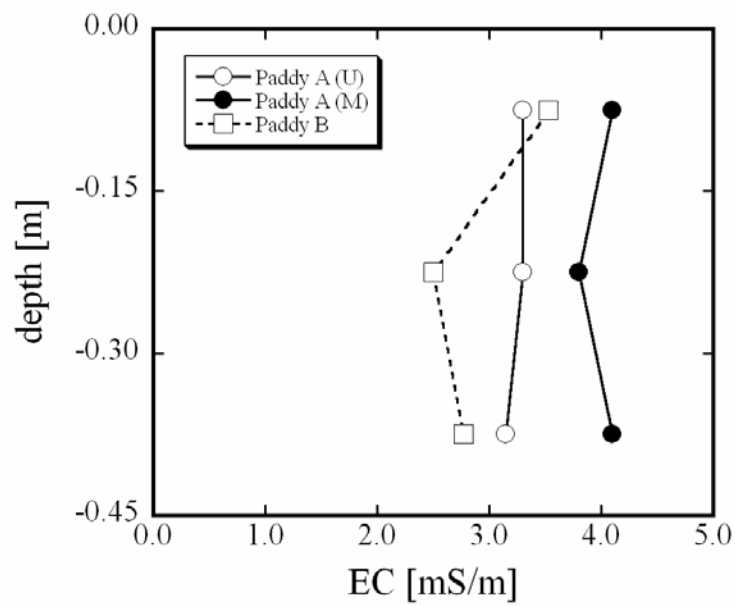


(b) 秋期

图 5.2-5 2005 年 pH 分布



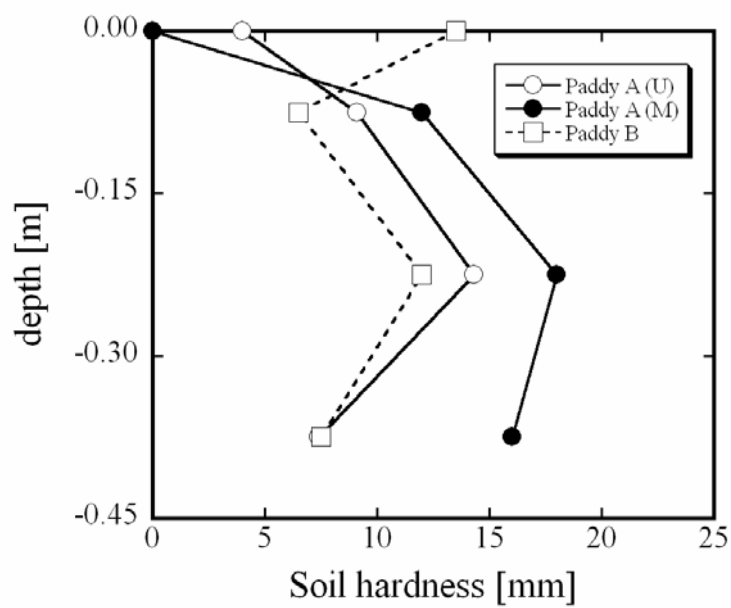
(a) 春期



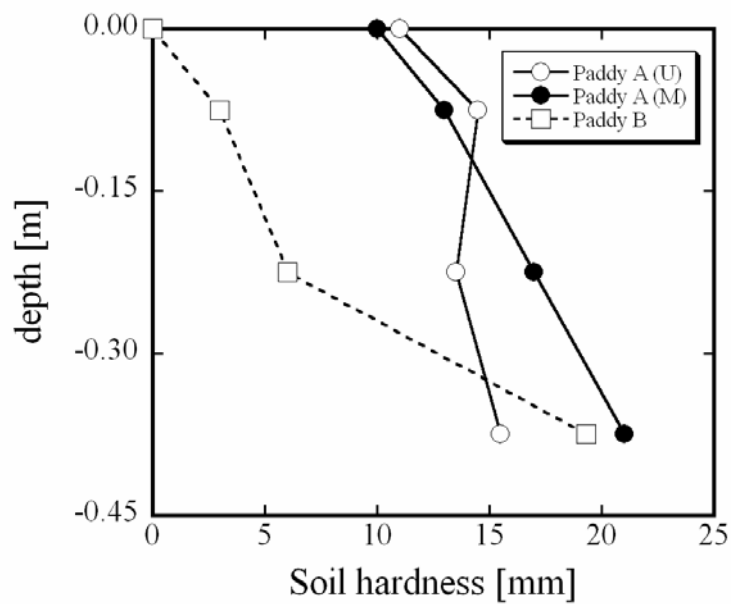
(b) 秋期

図 5.2-6 2005 年の EC 分布



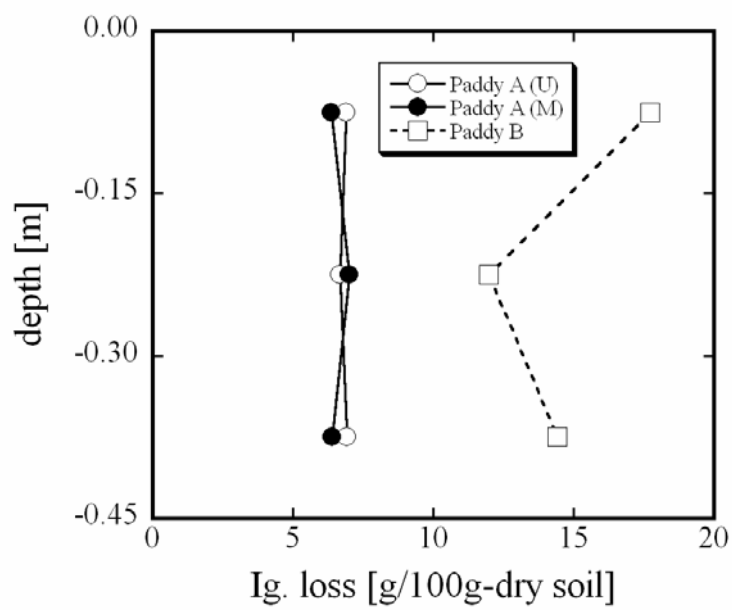


(a) 春 期

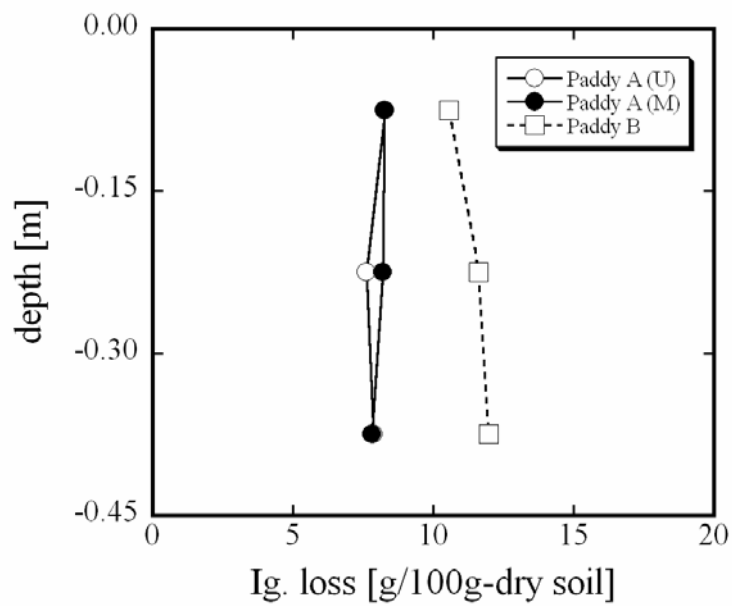


(b) 秋 期

図 5.2-7 2005 年 の 土 壌 硬 度 分 布

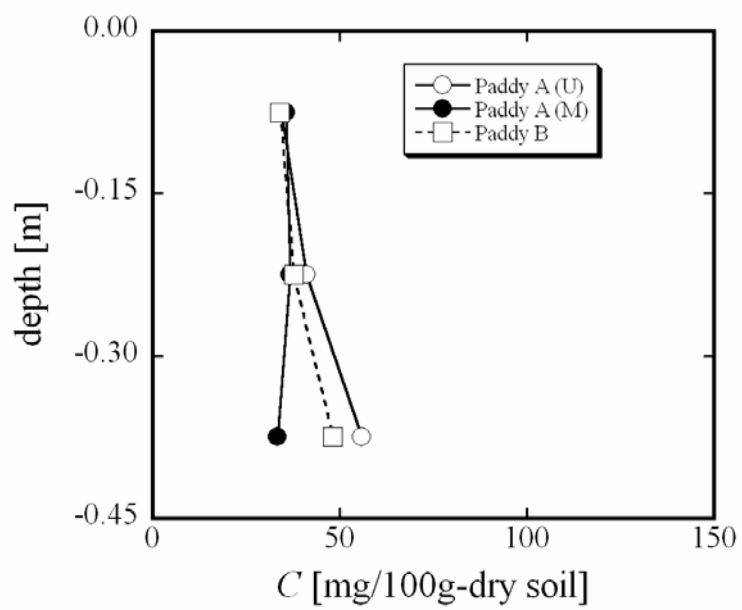


(a) 春 期

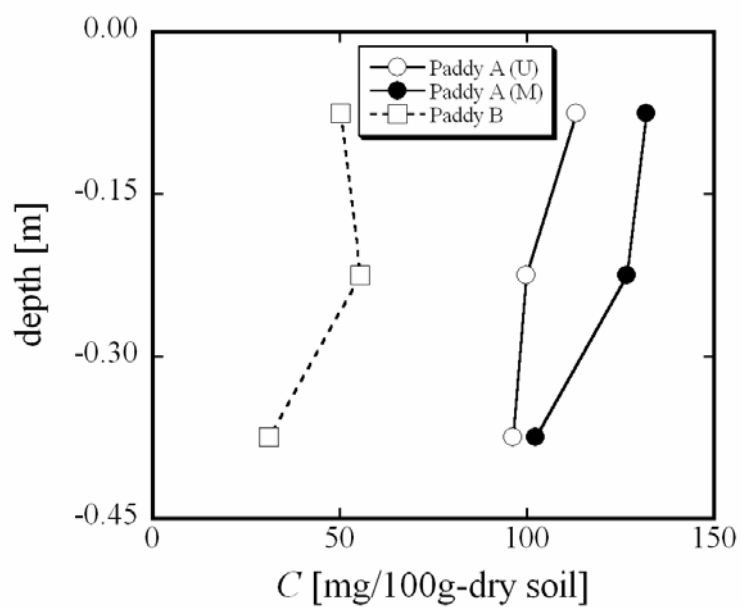


(b) 秋 期

図 5.2-8 2005 年 の 強 熱 減 量 分 布



(a) 春期



(b) 秋期

図 5.2-9 2005 年の硫酸イオン分布

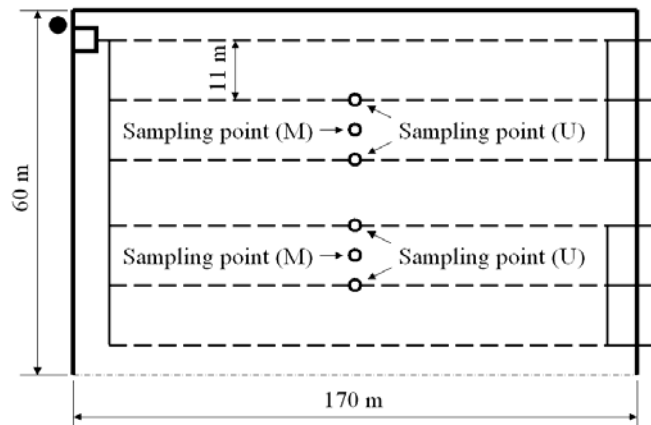


図 5.3-1 地下かんがいシステムを備えた玉葱圃場 A

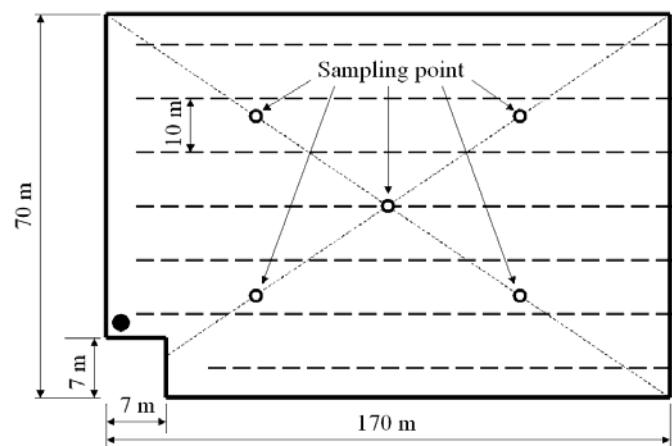


図 5.3-2 かんがい排水を備えた玉葱圃場 B

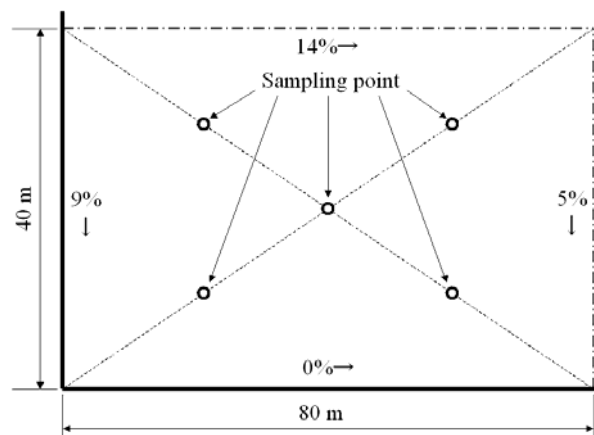
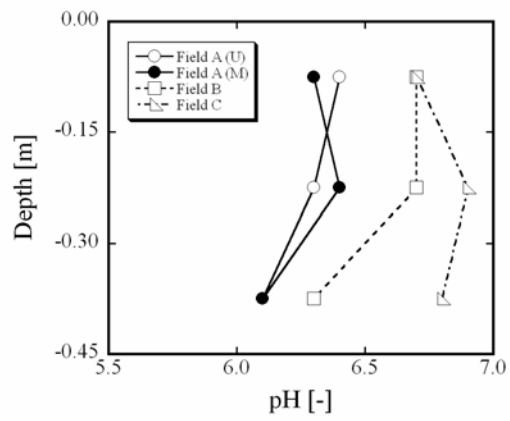
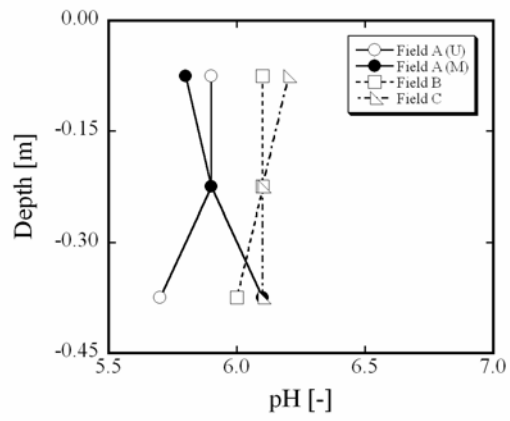


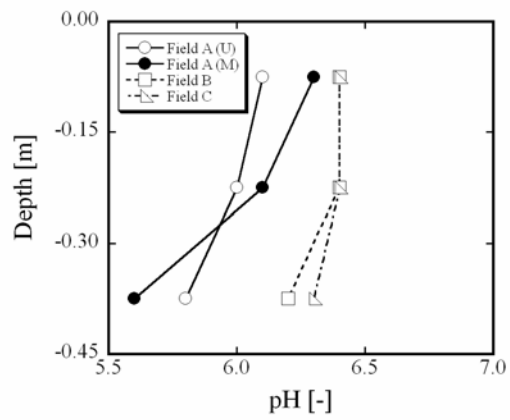
図 5.3-3 丘陵部に位置する玉葱圃場 C



(a) 春期

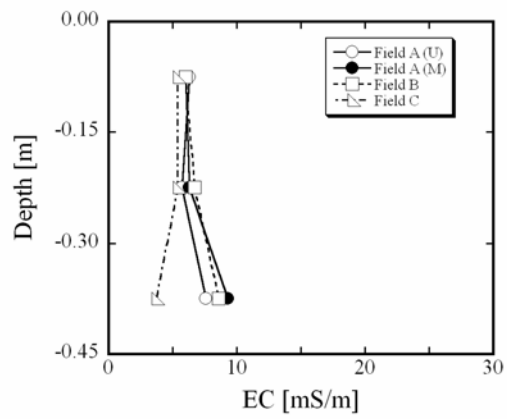


(b) 夏期

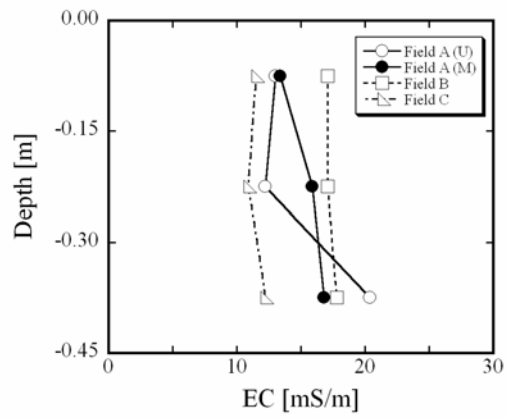


(c) 秋期

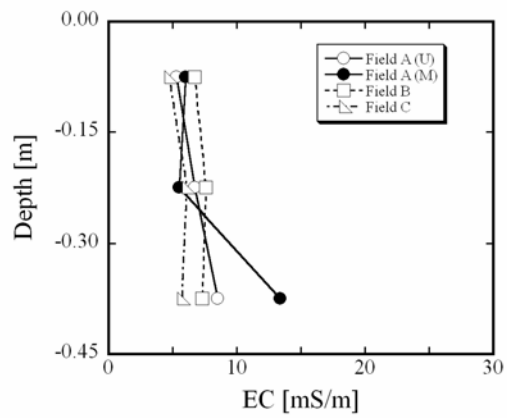
図 5.3-4 2005 年の深さ方向 pH 分布



(a) 春期

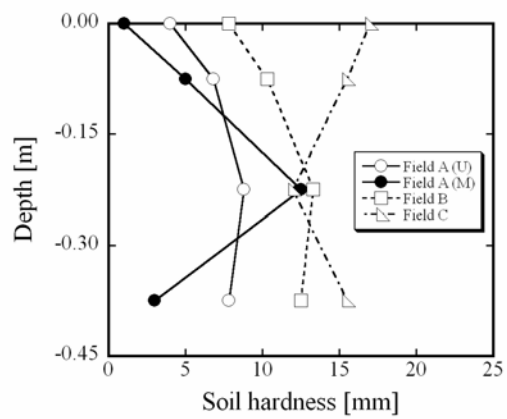


(b) 夏期

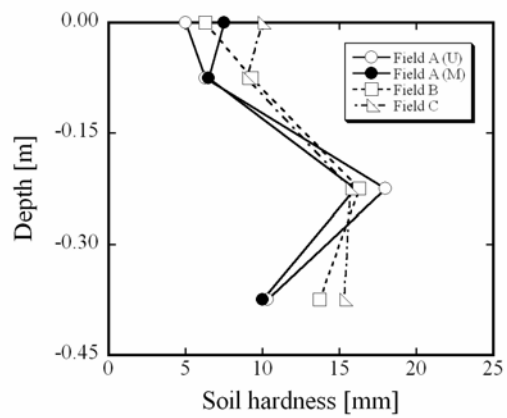


(c) 秋期

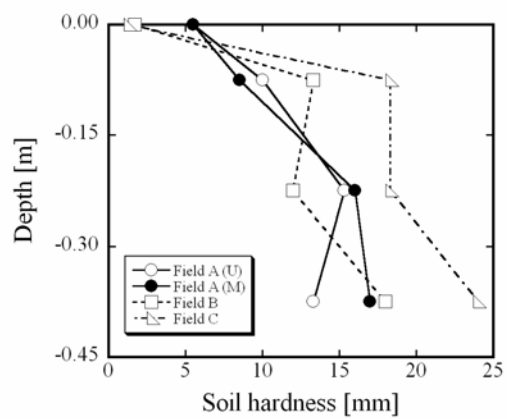
図 5.3-5 2005 年の深さ方向 EC 分布



(a) 春期

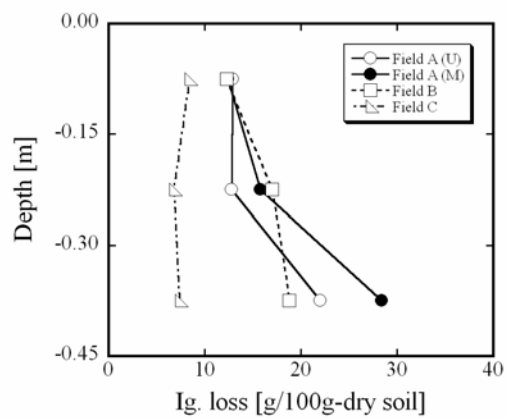


(b) 夏期

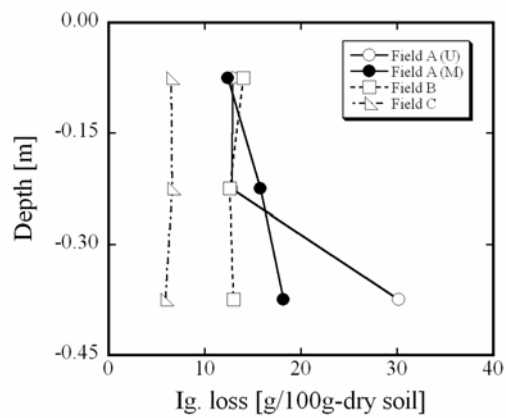


(c) 秋期

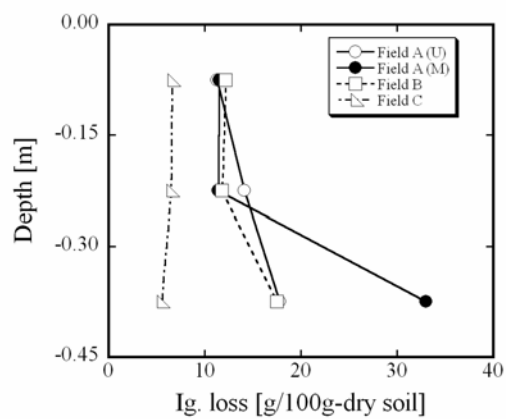
図 5.3-6 2005 年の深さ方向土壌硬度分布



(a) 春期



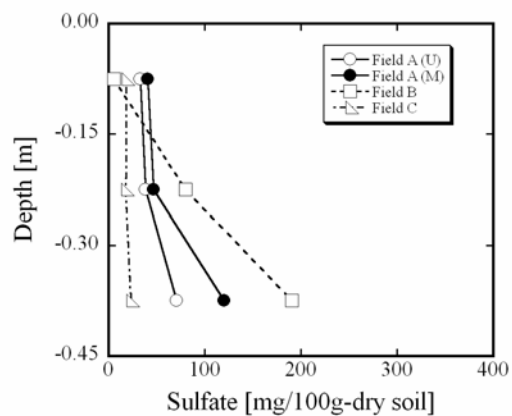
(b) 夏期



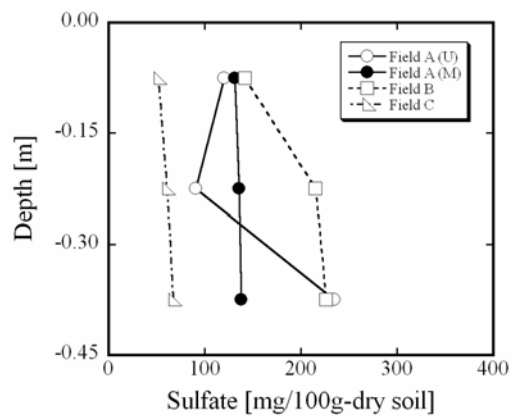
(c) 秋期

図 5.3-7 2005 年の深さ方向強熱減量分布

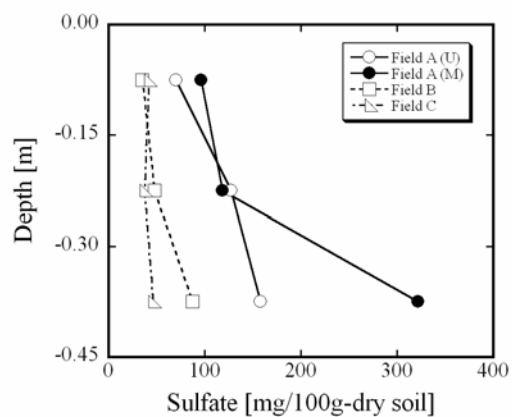




(a) 春期



(b) 夏期



(c) 秋期

図 5.3-8 2005 年の深さ方向硫酸イオン分布

## 第6章 地下かんがいシステム用流量計の開発

### 1. 緒言

第5章で、地下かんがいシステムを備えた圃場の土壌特性について検討した。地下かんがいシステムを導入した圃場の用水供給流量は $2.5 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ が適正(呼び径150 mmのパイプで液高さ2.5–3 cmが目安)とされている(北海道空知支庁東部耕地出張所, 2006)。しかし、これは呼び径150 mmのパイプが接続された開水路型用水路にのみ適用できる指針であり、異なる供給方法に対して適用できない。用水供給流量を測定するには、用水供給方法に適した流量測定法が必要である。

本章では、地下かんがいシステムを導入した圃場の地下へ導く用水流量を簡便に測定する方法の確立を目的とした。開水路型用水路に接続された場合に対応するため水道用キャップを加工した堰式流量計、閉水路型用水路に接続された場合に対応するためアクリル板を加工したオリフィス式流量計、水道用パイプを組み合わせた筒型流量計を作製した。作製した流量計の基本的データを屋内実験で取得し、その結果をもとに富良野盆地地区の試験圃場で屋外実験を実施した。

### 2. 堰式流量計

#### 2.1 試験圃場の概要

試験圃場は各種野菜の栽培を行っている畑作圃場と稲作を行っている水田圃場の2つがある。試験圃場の暗渠管入口側は鈴和統と称される土質であり、土壌断面柱状図によれば、埴壤土(CL, 0–0.19 m), 砂質埴壤土(SCL, 0.19–0.24 m), 軽壤土(LiC, 0.24–0.50 m), 重壤土(HC, 0.50 m 以下)からなる。一方、暗渠管出口側は中富良野統に属する土壌であり、土壌断面柱状図によれば、埴壤土(CL, 0–0.10 m), 低位泥炭土(LP, 0.10 m 以下)とされている。地下かんがいシステムを導入した試験圃場 A 俯瞰図を図 6.2-1 に示す。試験圃場は2圃場とも同形で、大きさは約30 m × 約100 mである。試験圃場の畦内側に深さ1.0 mまで遮水シートが設置されており、圃場間の水移動を抑えている。地下かんがいシステムは取水部、導水部、貯水部、観測部、排水部からなる。取水部は集中管理孔システム、導水部は10 m間隔で設置されている3本の暗渠管( $\phi 60$ )、貯水部はモミガラやチップを充填した集水渠、観測部は3ヶ所に設置された水位観測孔、排水部は1つの水平水閘と2つのネジ式水閘から構成される。試験圃場 A は開水路タイプの集中管理孔システムが設けられている。集中管理孔システムの概略図を図 6.2-2 に示す。トラフに設けられたシャッターを開けると取水され、用水は呼び径150 mmのパイプで分水柵を通過して圃場地下に導かれる。用水は呼び径50 mmのエア抜き管が組み込まれている呼び径125 mmのパイプと、圃場地下に設置されている3本の暗渠管を通過して集水渠に導水される。集水渠の標準施工断面図を図 6.2-3 に示す。集水渠は500 mmのチップ層と150 mmモミガラ層からなり、作土層は250 mmである。集中管理孔システムと暗渠管によって導かれた用水で集水渠が満たされると、水は表

面張力によって作土層に吸い上げられる。集水渠を通る3本の暗渠管内の水は、出口付近で再び連絡管によって集められ、中央の暗渠管出口に設けられた水平水閘から排水される。図 6.2-4 に水平水閘の概略図を示す。水平水閘は手動で開閉でき、かんがいを目的とする場合は閉じておき、排水を目的とする場合は開けておく。また、他の2本の暗渠管には調整機能付ネジ式水閘が設けられているが、通常は閉じたままである。

## 2.2 堰式流量計の基本設計理論

図 6.2-5 に示すように、パイプ内を流れる密度  $\rho$  の非圧縮性液体が、堰幅  $W$  の堰式流量計を流速  $u$  で通過し、堰出口での液高さを  $H$  とする。パイプ内の流速が堰式流量計を通過する際の流速に比べて十分小さいとすると、ベルヌーイの式は次式となる。

$$\rho gH = \frac{1}{2} \rho u^2 + \Delta P \quad (6.2-1)$$

ここで、 $\Delta P$  は断面積変化や出口形状による圧力損失である。圧力損失  $\Delta P$  は単位体積あたりの運動エネルギー  $(1/2)\rho u^2$  に抵抗係数  $K_i$  を乗じた形で記述でき、複数の抵抗がある場合は次式で表すことができるとする。

$$\Delta P = \sum_i^n \left[ K_i \left( \frac{1}{2} \rho u^2 \right) \right] \quad (6.2-2)$$

式(6.2-1)に式(6.2-2)を代入して整理すると、次式が得られる。

$$u = \sqrt{\frac{2gH}{1 + \sum K_i}} \quad (6.2-3)$$

流路断面積  $A$  は堰幅  $W$  と液高さ  $H$  の積である。よって、流量  $Q$  は次式のようになる。

$$Q = Au = WH \sqrt{\frac{2gH}{1 + \sum K_i}} = \sqrt{\frac{2g}{1 + \sum K_i}} WH^{1.5} \quad (6.2-4)$$

式(6.2-4)より、堰式流量計を通る水の流量  $Q$  は堰幅  $W$  の1乗、液高さ  $H$  の1.5乗に比例することが示唆される。ここで、比例定数項を  $K$ (流量係数)とおくと、式(6.2-4)は四角堰(沖, 1935)による水の流量測定に用いられる計算式と同じ形になる。

$$Q = KWH^{1.5} \quad (6.2-5)$$

## 2.3 実験装置及び方法

### 2.3.1 屋内試験

一例として呼び径 125 mm のパイプ用の堰式流量計を写真 6.2-1 に示す。堰式流量計は水道用の塩化ビニル製キャップ(ヒシ HI 継手, A 型, 呼び径 75–150 mm)を加工することで作製した。キャップの面を縦に切削することで幅 5–23 mm の溝をつけた。溝側方に液高さ測定用の目盛りを 10 mm 間隔でつけた。流量検定用パイプラインの一例として呼び径 75 mm の場合を写真 6.2-2 に示す。呼び径 75–150 mm の VU パイプ 2

m(ヒシパイプ, 排水管, 一般用) を長さ 1.7 m と長さ 0.3 m に切断して実験に使用した. 長さ 1.7 m のパイプ先端に堰式流量計を装着し, もう一方のパイプ端に 90°エルボ(ヒシ DV 継手)を取り付けた. 長さ 0.3 m のパイプをエルボに装着させ, ここから水道水を供給した. パイプ傾斜は 1/500 とした. 管内流動が定常になってから, 堰式流量計から流出している水の流量  $Q$  を測定した. 測定には取手付きビーカーもしくはバケツ, ストップウォッチ, 電子天秤(HW-100KGL, 最小目盛 0.01 kg, エー・アンド・ディ製)を用いた. 水の流量  $0\text{--}0.41\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  の範囲で変化させながら堰式流量計の目盛りで液高さ  $H$  を測定した.

### 2.3.2 現地試験

写真 6.2-3 に示すように, トラフと試験圃場に設置された分水柵を繋ぐ取水パイプの先端は分水柵側面までであり, 写真 6.2-1 のようなキャップをパイプ外側に装着させることができない. そこでキャップ側面を削り, パイプ内に差し込む方式とした. 呼び径 150 mm の VU パイプは外径 165 mm(平均許容差 $\pm 0.5\text{mm}$ ), 厚さ 5.1 mm(許容差 $+0.8\text{mm}$ )である. よって, VU パイプは近似内径 154 mm とされているが許容差を考慮するとパイプ内径は 152.7–155.3 mm の値をとりうる. 写真 6.2-4 に示すように呼び径 125 mm のキャップ側面を 100 mm にわたって外径が 157 mm から 152 mm になるように切削した. 堰幅  $W$  は 10–30 mm とした. なお, 呼び径 150 mm のキャップは曲面になっているため, 10mm 間隔の目盛りは, 実測したところ約 9 mm 間隔であった. 測定では目盛りを使用した, データ解析を行うにあたっては約 0.9 倍することで実際の高さに換算した.

## 2.4 実験結果および考察

### 2.4.1 屋内試験

まず, 呼び径 75 mm のパイプラインに堰式流量計を装着せずに水を流した(写真 6.2-5, 上). その結果, 液高さは約 10 mm であり, 流量を 2 倍程度変化させても液高さはほとんど変化しなかった. このことから, パイプ端から流出する水の高さによって流量調整を行うことは難しいことが確認された. 次に, パイプラインに堰幅 10 mm の堰式流量計を装着して同流量の水を流した(写真 6.2-5, 下). 液高さを容易に計測することができ, 流量を変化させると液高さは大きく変化した. 堰式流量計を装着させることで, 液高さの変化を基準にした流量測定及び制御を行いやすくなることが確認された. 呼び径 75–150 mm の場合について, 図 6.2-6 に  $Q/W$  と液高さ  $H$  の関係をプロットした. プロットは多少バラツキがあるものの, 呼び径ごとにほぼ直線状となった. プロットを直線近似し, 相関線を求めると次のようになった.

呼び径 75 mm	$Q/W = 1.50H^{1.35}$
呼び径 100 mm	$Q/W = 1.90H^{1.46}$
呼び径 125 mm	$Q/W = 1.88H^{1.41}$
呼び径 150 mm	$Q/W = 2.12H^{1.54}$

呼び径ごとに液高さ  $H$  のべき数は 1.5 に近いものの若干異なる。また、呼び径が大きくなると液高さ  $H$  のべき数が 1.5 に近づく傾向にある。これは水に作用する重力の影響であると考えられる。ダムのカレストゲート等では、ゲートから少し離れた位置でのダム湖水位とゲート下端との差を液高さとしており、ゲート出口側における水面からゲート下端までを液高さとしていない。しかし、本実験系ではパイプ内の液高さを測定することが困難であるため、出口側で液高さを測定している。堰式流量計の正面からパイプ内の液高さを目視確認したところ、流量によって異なるが数 mm から十数 mm 高く、本実験では液高さが小さく見積もられていると思われる。重力による水面低下距離を  $\Delta H$  とすると、本来式(6.2-1)で使用するべき液高さは  $H+\Delta H$  となる。これに基づき式を際導出すると次のようになる。

$$Q = KWH^{1.5} \left( 1 + \frac{\Delta H}{H} \right)^{0.5} \quad (6.2-6)$$

この式で、 $\Delta H/H$  が 1 よりも十分小さい場合は、

$$(1 + \Delta H/H)^{0.5} \doteq 1 \quad (6.2-7)$$

であり、 $\Delta H/H$  が 1 よりも十分大きい場合は、

$$(1 + \Delta H/H)^{0.5} \doteq (\Delta H/H)^{0.5} \quad (6.2-8)$$

である。よって、水面低下距離  $\Delta H$  を考慮すると流量  $Q$  に対する液高さ  $H$  のべき数は 1.0–1.5 の値をとりうる。本実験結果で得られた液高さ  $H$  のべき数は 1.35–1.54 であり、水面低下距離  $\Delta H$  を考慮した場合のべき数範囲に入る。流量係数  $K$  については、式(6.2-4)で圧力損失が存在しない( $\sum K_i=0$ )と仮定して計算すると 4.43 となる。実験結果から求めた流量係数は 1.50–2.12 であり、計算結果と一致しない。これは、流路縮小や堰式流量計のエッジ形状などによる圧力損失(亀井, 1975)が無視できないことを示している。流量係数  $K$  から抵抗係数の和  $\sum K_i$  を逆算すると次のようになる。

呼び径 75 mm	$\sum K_i=7.7$
呼び径 100 mm	$\sum K_i=4.4$
呼び径 125 mm	$\sum K_i=4.6$
呼び径 150 mm	$\sum K_i=3.4$

縮流や溝のエッジ形状による抵抗係数の値は 0.5 程度であるため、これらだけでは計算結果を説明できない。この差異は現時点では不明であるが、今回考慮した抵抗係数は管内を液が満たしている場合の値であること、堰式流量計を通過する際の速度分布が関与していること、水面低下距離が影響していること、などが理由として考えられる。また、呼び径が大きくなると流量係数が大きくなっている。パイプ内径に関連深い物理量が関係している可能性がある。

前述したように、今回開発した堰式流量計は堰幅  $W$  の 1 乗と液高さ  $H$  の約 1.5 乗に比例する。液高さ  $H$  のべき数が式(6.2-4)と厳密に一致していないこと、流量係数の値が抵抗係数で十分説明できていないことなど、科学技術的な課題をいくつか残して

いるものの、堰式流量計での実用的な流量測定・制御は可能である。そこで、呼び径 150 mm のパイプで流量検定用パイプラインを組み立てた。写真 6.2-4 で示した屋外実験用堰式流量計を呼び径 150 mm のパイプの内側に差し込む装着法を試みたところ、約 40 mm 挿入したところで固定できた。流量  $0.40 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  でパイプラインに水を流したところ、堰式流量計の装着部からの水漏れは確認されなかった。同じ呼び径で堰幅の異なる堰式流量計に対しても装着を試した結果、装着可能であり、水漏れはなかった。堰幅の異なる 3 種類の堰式流量計を用いて流量  $0\text{--}0.40 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  の場合の液高さ  $H$  を測定した。その結果を図 6.2-7 に示す。液高さ  $H$  と流量  $Q$  を堰幅  $W$  で除した  $Q/W$  の関係は両対数プロットでほぼ直線となった。データを直線近似した場合の相関式は次式で表すことができる。

$$Q/W = 2.07H^{1.40} \quad (9)$$

式中の液高さ  $H$  のべき数は 1.40 であり、前述した屋内実験の呼び径 125 mm の場合とほぼ同じである。また、流量係数は前述した屋内実験の呼び径 125 mm の場合とほぼ同じである。屋外用堰式流量計で堰幅  $W$  をパラメータとした場合について、取水流量  $Q$  と流量計目盛りとの関係を図 6.2-8 に示す。 $0.40 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  を超える流量は屋内実験で検討できなかった範囲であるため推定線となる。適正とされている取水流量  $2.5 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  を実現するには、堰幅 20 mm の場合は目盛り 13.5 に合わせれば良い。また、堰幅 30 mm の場合は目盛り 10 に液高さを合わせることで取水流量  $2.5 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  を実現できる。

#### 2.4.2 現地試験

平成 17 年春の作付け前に堰式流量計を装着しないで水田圃場に取り水した。呼び径 150 mm のパイプの半分程度となる液高さ(約 80 mm)で取水を行ったため、まもなく分水路に水が溜まり、集水渠への導水がしづらくなった。導水後の圃場の様子を写真 6.2-6 に示す。写真手前側が暗渠管入口であり集中管理孔がある。写真奥側が暗渠管出口である。暗渠管入口側の圃場表面からは水が噴出し、明らかに水分過剰の状態である。また、水溜りとなった圃場表面の各所で気泡が発生していた。これは作土層を通過してきた集水渠内の空気と思われる。写真奥の暗渠管出口側は集水渠上が若干湿っているが表面のほとんどは乾燥しており、圃場表面が均一に濡れていない。このような不均一状態で野菜の栽培を行えば、圃場内で生育に違いが生じる可能性がある。集水渠に水が導水されると、導水された水量と同体積の空気が作土層を通過して抜ける。作土層を透過できる空気流量を超える取水(集水渠への導水)が行われると、抜けなかった空気が圧縮されて導かれた水を押戻す。集水渠内の圧縮された空気が抜けるまで暗渠管入口側にしか水が供給されない。このような仕組みで暗渠管入口側と暗渠管出口側で集水渠の地下水位が同じにならなかったと考えられる。以上のことから、取水流量を適切に制御できないと圃場の地下水位を均一にすることは難しいことがわかった。平成 19 年秋に、作製した堰式流量計(呼び径 125 mm, 堰幅 20 mm)を用いた取水試験を行った。写真 6.2-7 のように分水路に堰式流量計を取り付けた。流量  $2.5 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  を実現するため、堰式流量計を通過する用水が目盛りで 13.5 になるようにトラフ

のシャッターを開けた。取水開始から 7 時間後、写真 6.2-6 のような局所的な水の噴出しはなく、圃場表面をほぼ均等に湿らせることができた。また、堰式流量計の取り外しも容易であり、取水中に水圧で外れることはなかった。観測孔①、③で測定した地下水位の経時変化を図 6.2-9 に示す。取水前、すなわち時刻 0 での圃場地下水位は観測孔①(鈴和統)で $-0.48$  m、観測孔③(中富良野統)で $-0.64$  m であった。これらの水は雪解け水等が集水渠に残っていたものである。観測孔①付近の地下 0.40m 以下は粘土分の多い重壤土とされており、集水渠周辺は水が抜けにくい土質と推測される。そのため取水前の地下水位が高めであったと思われる。観測孔③付近は地下 0.10m から低位泥炭土とされている土質である。集水渠周辺は泥炭土であり、水を保持しやすい。そのため地下水位が低くなっていたものと思われる。用水を導入すると観測孔①、③ともに地下水位は時間の経過とともに上昇した。図中○で示される観測孔①(鈴和統)における地下水位の変化をみると、取水開始 6 時間後から 7 時間後で急に地下水位が上昇している。この現象は圃場地下を構成する粒子の空隙率の違いに起因していると考えられる。集水渠は地下 $-0.35$  m までであり、それより上は作土層である。集水渠(モミガラ層)はその求められる機能ゆえ空隙率が大きい、作土層は様々な粒子からなるため空隙率が小さい。6-7 時間で地下水位が $-0.35$  m を超えていることから、地下水位が作土層に達したと考えられる。一方、図中◆で示される観測孔③(中富良野統)の地下水位変化をみると、3 時間後の地下水位 $-0.46$  m を境に上昇傾向が変化している。集水渠は $-0.35$  m 付近までであることから、地下 $-0.46$  m で構造、特に空隙率が変化していると考えられる。図 6.2-3 の集水渠の標準施工断面図より、地下 $-0.46$  m 付近はチップ層とモミガラ層の境界であると考えられる。モミガラ層と思われる範囲の地下水位上昇速度は観測孔①(鈴和統)で  $0.03 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 、観測孔③(中富良野統)で  $0.04 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$  であり、若干異なっている。このことから、地下水位の上昇速度は圃場地下の土質と関係があると考えられる。2 地点で土質は異なるものの、地下水位の平均上昇速度は  $0.035 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$  である。集水渠のモミガラ層面積は約  $66 \text{ m}^2$  ( $0.249-0.238 \text{ m} \times 90 \text{ m} \times 3$  本)である。モミガラ層の空隙率を 0.9 と仮定して流量を計算すると  $0.6 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  と計算される。これは実際の取水流量  $2.5 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  の約 1/4 である。集水渠内の地下水位上昇に寄与しなかった残り約 3/4 の水は、集水渠側面から土壤に吸収され、圃場の横方向への水供給に使われていると考えられる。

### 3. オリフィス式流量計

#### 3.1 試験圃場の概要

試験圃場は各種野菜の栽培を行っている畑作圃場である。土壤は中富良野統に属し、土壤断面柱状図によれば、埴壤土(CL, 0-0.10 m)、低位泥炭土(LP, 0.10 m 以下)とされている。閉水路型用水路に接続された地下かんがいシステムを導入した試験圃場の俯瞰図を図 6.3-1 に示す。試験圃場の大きさは約  $60 \text{ m} \times$  約  $170 \text{ m}$  である。集中管理甲は図 6.3-2 に示す通りで、その他の事項については前節の試験圃場と同様である。

### 3.2 オリフィス式流量計の基本設計理論

写真 6.3-1 に示す集中管理孔の柵にオリフィス板を設置することで水を溜め、その水位  $h$  とオリフィス孔径  $D$  から用水流量  $Q$  を測定した。オリフィス孔を通過する水の速度を  $u$ 、水の密度を  $\rho$ 、重力加速度を  $g$  として、Bernoulli の定理を適用すると

$$\frac{1}{2} \rho u^2 = \rho gh \quad (6.3-1)$$

が得られる。式(6.3-1)を整理して流路断面積  $A(= \pi D^2/4)$  を乗じ、オリフィス孔を通過する水の流量  $Q$  を求めた。

$$Q = Au = \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) \sqrt{2gh} \quad (6.3-2)$$

式(6.3-2)より、流量  $Q$  は水位  $h$  の 0.5 乗とオリフィス径の 2 乗の積に比例する。

### 3.3 実験装置及び方法

#### 3.3.1 屋内試験

図 6.3-3 に実験装置図の概略図を示す。集中管理孔の柵を模した容器として底部中央に使用するオリフィス孔径よりも大きい穴を開けた一辺が 110–280 mm のアクリル樹脂製角型容器を用いた。容器底部にアクリル樹脂製オリフィス板を設置した。水槽内に供給する水を減勢するため、木製の板(厚さ 5.5 mm, 長さ 287 mm, 幅 40–140 mm)を斜めに立て掛けて使用した。実験に用いたオリフィス板のオリフィス形状を図 6.3-4 に示す。形状(a)–(d)の 4 種類を用意した。形状(a)のオリフィス板は、オリフィス径  $D$  を 10–40 mm で作製した。形状(b), (c)のオリフィス板はオリフィス径  $D$  を 10–30 mm とし、水の入口側(b)または出口側(c)に 30–120°のテーパ角  $\theta$  を設け、削り深さ  $L$  は 2.5–7.5 mm の範囲でそれぞれ変化させた。形状(d)のオリフィス板はオリフィス径  $D$  を 20 mm とし、出入口側ともに 30–120°のテーパ角  $\theta$  を設け、削り深さ  $L$  はそれぞれ 2.5 mm とした。内径 13 mm のビニルホースの先端を水槽底面から 500 mm の位置で、ホース先端が角型容器の底部に設けた孔の直上になるように設置し、水槽に水を供給した。水温は 7.8–18.1 °C, 水の流量は  $0\text{--}0.64 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  の範囲で実験を行った。水の供給を開始すると水槽内に水が溜まり、水位が上昇する。水位が一定になるまで(供給開始後 10 min 程度)待ち、水位  $h$  とオリフィス孔を通過する水の流量  $Q$  を測定した。流量は水をバケツに取水し、取水時間をストップウォッチで計り、電子天秤(最小秤量値 0.01 kg)で水の質量を測定した。

#### 3.3.2 現地試験

平成 21 年夏に、試験圃場用にオリフィス板を作製し、用水導入試験を行った。圃場に設置された柵(底面 360×360 mm, 上面 380×380 mm, 高さ 380 mm)の高さから、水位  $h = 380 \text{ mm}$  で一定となるように式(6.3-2)からオリフィス径  $D$  を求めると、導入流量  $2.5 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  の場合では 34 mm と算出される。また、柵から暗渠管に繋がるパイプ接合部の孔径は 130 mm である。これらの条件に合うように、アクリル樹脂製のオリフ



イス板を設計し、現地圃場の柵内に設置した。現地での測定は、オリフィス板が使用可能であることを確認する定常試験と、柵内に溜めた水の水位降下時間から流量を測定する非定常試験を行った。

### 3.4 実験結果及び考察

#### 3.4.1 屋内試験

実験に先立ち予備実験を行った。写真 6.3-2 に示すようにホースから供給した水が、オリフィス孔より直接突き抜けてしまい、水槽内に水が溜まらない現象が確認された。そこで、水槽内に木製の板を設置し、水を減勢した。木製板の設置によって水を減勢することで、水槽内に水が溜まることが確認された。木製板の幅は本実験範囲では測定に影響しないと判断し全ての実験で幅 140 mm の木製板を設置して測定を行った。なお、水の突き抜け現象は、ホース先端の位置を容器中央のオリフィス孔上からずらすことによって解消できる。

水槽サイズを一定とし、オリフィス径の変更によって流量  $Q$  に与える影響を比較した。一例として、形状(a)のオリフィスを 180×180 mm の水槽に設置した場合の流量  $Q$  と水位  $h$  の関係を図 6.3-5 に示す。グラフの直線は(2)式から求めた計算線である。まず全体の傾向として、流量  $Q$  を増やしていくと水位  $h$  が高くなった。また、水位  $h$  が同じであればオリフィス径  $D$  が大きいと流量  $Q$  は多くなる。計算線と実測値を比較すると、流量  $Q$  の実測値は計算線よりも少ない。計算線の傾きは式(6.3-2)で示したように 0.5 乗である。水位  $h$  が約 0.02 m 以上のデータについては絶対値が異なるもののデータが計算線とほぼ平行になっている。しかし、水位  $h$  が約 0.02 m 以下のデータは、水位が低くなるにつれ計算線からプロットが離れる傾向を示し、計算線の傾きと大きく異なっている。これらの条件では、オリフィス孔の断面積に対して水の供給流量が少なく、図 6.3-6(a)に示すようにオリフィス孔の外周部のみを水が流れる上体であったことが原因と思われる。実測したデータが計算線と平行になる条件を求めるため、水位  $h$  とオリフィス径  $D$  の比  $h/D$  と、実測流量  $Q$  と式(6.3-2)から求めた計算流量  $Q_c$  の比  $Q/Q_c$  の関係を図 6.3-7 に示す。 $h/D$  が大きくなると  $Q/Q_c$  は大きくなった。若干のバラツキはあるものの、 $h/D \geq 0.5$  の範囲で  $Q/Q_c$  がおよそ 0.6–0.8 で一定となった。この範囲では図 6.3-6(b)に示すような状態であった。よって本法で流量を測定する場合、 $h/D \geq 0.5$  を満たす必要がある。

現地圃場の用水供給部に使用される柵のサイズは、市販品のためサイズが決まっており、底面の寸法は約 360×360 mm である。そこで、流量  $Q$  に及ぼす水槽サイズの影響を検討した。図 6.3-8 に形状(a)のオリフィス板を使用した場合の流量  $Q$  と  $h^{0.5}D^2$  の関係を示す。流量  $Q$  の実測値は計算線よりも少ないが水槽のサイズに関わらず、ほぼ直線状のプロットとなった。よって、流量  $Q$  に及ぼす水槽サイズの影響はほとんどないことがわかった。

図 6.3-9 に形状(a)–(d)のオリフィス板を使用した場合の流量  $Q$  と  $h^{0.5}D^2$  の関係を示す。テーパ角  $\theta$  を設けた形状(b)–(d)のオリフィス板を用いたプロットの傾向に違い

がみられる．▽で示した形状(b)，□で示した形状(d)のオリフィスを用いた場合，テーパ角をつけなかった形状(a)のオリフィスよりも計算線に近く，一部は計算線上にある．しかし，流量が  $3 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  以上の範囲については計算線から離れる傾向にある．この原因として，流速  $u$  が大きくなることで圧力損失<sup>4)</sup>が大きくなったことが挙げられる．一方，形状(c)のオリフィスは計算線から離れており，形状(a)のオリフィスとほぼ一致している．よってオリフィス板のテーパは水の入口側が流量  $Q$  に影響を及ぼし，出口側は影響しないことがわかった．形状(b)のオリフィス板のテーパ角  $\theta$  を  $30\text{--}120^\circ$  に変化させた場合の流量  $Q$  とパラメータ  $h^{0.5}D^2$  の関係を図 6.3-10 に示す．いずれのプロットにおいても形状(a)，(c)のプロット範囲よりも計算線に近い値を示しており，一部は計算線と一致している．以上のことから，オリフィスの水の入口側にテーパを設けることで流動抵抗を大幅に減らすことができ，流量  $Q$  を(6.3-2)式で計算できる．図 6.3-11 に水位  $h$  を一定(180–187 mm)とした場合の流量比  $Q/Q_c$  とテーパ角  $\theta$  の関係を示す．図から  $\theta = 60^\circ$  のプロットが  $Q/Q_c$  で 1 に最も近いことがわかる．これは流量係数がほぼ 1 となっていることを示している．次に流量比が大きいのが  $\theta = 30^\circ$ ， $90^\circ$  で 0.8 程度， $\theta = 120^\circ$  については  $\theta = 0^\circ$  の場合とほぼ同じであった．よって本研究での実験条件では，テーパ角  $\theta = 60^\circ$  とした場合に式(6.3-2)から求める計算流量に近い値を得られる．水位  $h$  を一定(180–187 mm)とした場合の流量比  $Q/Q_c$  と削り深さ  $L$  の関係を図 6.3-12 に示す．形状(a)にくらべて，形状(b)を用いた場合はいずれも  $Q/Q_c = 1$  に近い値となった．特に  $\theta = 60^\circ$  のデータは， $\theta = 90^\circ$  のプロットよりも  $Q/Q_c = 1$  に近い結果となり，図 6.3-11 の傾向と一致する． $L = 2.5$ ， $5 \text{ mm}$  については流量比  $Q/Q_c$  が 0.97 程度であり，ほぼ計算通りの流量となる． $L = 7.5 \text{ mm}$  のプロットは  $L = 2.5$ ， $5 \text{ mm}$  にくらべて若干小さい値となっているが，削り深さ  $L$  による差はあまり見られず一定とみなすことができる． $\theta = 90^\circ$  のプロットは，削り深さ  $L$  の変化による流量比  $Q/Q_c$  への影響は全く見られない．よってテーパ角を一定とすると，流量  $Q$  に及ぼす削り深さ  $L$  の影響はほとんどない．

これまでテーパ付オリフィス板については  $D = 20 \text{ mm}$  で固定して実験を行った．しかし，現地圃場の柵の高さに合わせて，式(6.3-2)から求める計算流量通りの流量が得られたとした場合のオリフィス径を求めると  $34 \text{ mm}$  となる．つまり，テーパ付オリフィス板についてもオリフィス径を変化させた場合についても流量に及ぼすテーパ角の影響を確認する必要がある．そこで，実験結果の中で計算流量と一致した値を示したテーパ角  $\theta = 60^\circ$  について，さらに実験を行った．図 6.3-13 にテーパ角  $\theta = 60^\circ$  で一定とした場合の，流量比  $Q/Q_c$  とオリフィス径  $D$  との関係について示す．結果はオリフィス径を  $10\text{--}30 \text{ mm}$  の間で変化させても流量比に違いはほとんど見られないことがわかる．最も流量比が小さい  $D = 30 \text{ mm}$  でも 0.95 程度であり， $0.015\text{--}0.025 \text{ m}$  では 0.98 ほどである．よってオリフィス径  $D$  による違いは見られず， $\theta = 60^\circ$  とすることで，式(6.3-2)から求める流量を得られることがわかった．

### 3.4.2 現地試験

富良野盆地地区にある試験圃場での導水試験について述べる。写真 6.3-3 に示すように、現地用にオリフィス板( $D = 34 \text{ mm}$ ,  $\theta = 60^\circ$ )を設計した。また、柵から暗渠管に繋がる、パイプ接合部の穴の直径は  $130 \text{ mm}$  である。そこでオリフィス板の底面を、直径  $130 \text{ mm}$ 、高さ  $2 \text{ mm}$  で円形に削りだし、写真 6.3-4 に示す集中管理孔の柵の底面にキャップの様にして設置した。よってオリフィス板の柵内高さは、 $0.008 \text{ mm}$  となる。まず、定常試験として水位  $h$  が  $0.14 \text{ m}$  で一定となるように、バルブを調整し導水試験を行った。オリフィス板が試験中に外れることはなく水位は保たれていた。また、 $h/D \geq 0.5$  という条件も満たしており、問題なく使用可能である。次に、導入流量を測定するために非定常試験を行った(写真 6.3-5)。定常試験後に水位  $0.14 \text{ m}$  から水位  $0.008 \text{ m}$  まで水を流出させ、水位降下時間を計測した。その結果、2 回の計測とも  $18 \text{ s}$  であった。この結果について妥当であるか検証する。まず、単位時間あたりにオリフィス孔を通過する水の質量と、柵から流出する水の質量は等しくなるため、連続の式より次式で示せる。

$$\rho A_0 u_0 = \rho A_s u_s \quad (6.3-3)$$

ここで  $A_0$  はオリフィス孔の断面積、 $u_0$  はオリフィス孔を通過する水の流速、 $A_s$  は柵の平均断面積、 $u_s$  は水面の降下速度である。オリフィス孔の入口側に  $\theta = 60^\circ$  のテーパを設けることで式(6.3-2)から求める計算流量と、ほぼ一致した流量が得られることがわかっている。そこで、流動抵抗がないものとして次の式を導いた。

$$u_0 = \sqrt{2gh} \quad (6.3-4)$$

また、柵平均断面積  $A_s (= L_m^2)$ 、オリフィス断面積  $A_0 (= \pi D^2/4)$  とおき、さらに水面降下速度  $u_s$  は水位  $h$  の時間変化であるため、次式で求められる。

$$u_s = -\frac{dh}{dt} \quad (6.3-5)$$

以上、式(6.3-3) – (6.3-5)を整理すると次式が得られる。

$$-\frac{dh}{dt} = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{L_m} \right)^2 \sqrt{2gh} \quad (6.3-6)$$

式(6.3-5)に  $t = 0$ ,  $h = h_0$  の初期条件を適用、積分し変形すると、水の液高さ  $h_0$  から液高さ  $h$  まで自然流出するのに要する時間  $t$  は次式で求められる。

$$t = \frac{8(\sqrt{h_0} - \sqrt{h})}{\pi\sqrt{2g}} \left( \frac{L_m}{D} \right)^2 \quad (6.3-7)$$

式(6.3-7)に非定常試験の条件( $h_0 = 0.14 \text{ m}$ ,  $h = 0.008 \text{ m}$ ,  $L_m = 0.364 \text{ m}$ ,  $D = 34 \text{ mm}$ )を代入すると、 $t = 18.8 \text{ s}$  となる。この計算結果は現地試験で得られた  $t = 18 \text{ s}$  とよく一致する。以上より、式(6.3-3) – (6.3-5)による計算が妥当であることが確認された。本研究で導いた式及び得られた知見から、現地圃場で流量を測定するためのオリフィス板の設計が可能となった。

## 4. 筒型流量計

### 4.1 圃場の概要

前節までの検討は柵下部から用水が導入される地下かんがいシステムであったが、平成 20 年度から始まった国営農地再編整備事業で富良野盆地地区に導入される地下かんがいシステムでは、用水導入口が柵側面に設けられる。図 6.4-1 に柵の写真を、図 6.4-2 に集中管理孔の概略図を示す。柵の壁面に暗渠管への接続部がある。接続部には長さ約 20 cm のゴミよけネットが設置されているため、堰式流量計やオリフィス板による流量測定が難しい。

### 4.2 筒型簡易流量計の基本設計理論

図 6.4-3 に示すように、非圧縮性流体が流量  $Q$  で連続的に供給される条件を想定する。筒状のパイプに溜められた密度  $\rho$  の水が孔径  $D$  を有するキャップ及び径違いソケットを流速  $u$  で通過し、その際の筒内水位を  $h$  とする。ここで孔を通過する水と筒内を通過する水は、

$$\rho A_1 u_1 = \rho A_2 u_2 \quad (6.4-1)$$

より、流量  $Q$ 、流速  $u$ 、断面積  $A$  の関係は次式となる。

$$A_1 u_1 = A_2 u_2 = Q \quad (6.4-2)$$

また、重力加速度を  $g$  として、Bernoulli の定理を適用すると次式が得られる。

$$\frac{1}{2} \rho u_1^2 + \rho g h = \frac{1}{2} \rho u_2^2 + \sum K_i \frac{1}{2} \rho u_2^2 \quad (6.4-3)$$

ここで、単位体積あたりの運動エネルギーにかかる抵抗係数を  $K_i$  とおき、複数の抵抗がある場合を考慮し  $\sum K_i$  で示す。式(6.4-3)に式(6.4-2)を代入し整理すると、

$$Q = A_2 u_2 = A_2 \sqrt{\frac{2gh}{\left(1 + \sum K_i\right) - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \quad (6.4-4)$$

が得られる。ここで、流量計断面積  $A_1$  がオリフィス断面積  $A_2$  よりも十分大きい場合、分母にある流路断面積比  $A_2/A_1$  は無視できる。また、流量計出口に設置されるキャップのオリフィスにテーパ角などを設けた場合および径違いソケットを用いた場合において、流動抵抗がないもの考えると次式で示すことができる。

$$Q = Au = \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) \sqrt{2gh} \quad (6.4-5)$$

### 4.3 実験装置及び方法

筒型流量計に用いたキャップについて図 6.4-4 に示す。水道用のキャップ(ヒシパイプ HI 継手、呼び径 25 mm, 50 mm)を加工することで作製した。キャップの中心を円状に切削することで直管状の孔を設け、孔径は  $D = 10.0\text{--}15.0\text{ mm}$  として用意した。また、水の入口側となる孔の内側に、 $\theta = 60^\circ$  のテーパ角を約 2 mm の深さとしたもの

も用意した。キャップの他に水の縮流に使用したものとして、図 6.4-5 に示す径違いソケット(呼び径 25 mm×13 mm, 25 mm×16 mm)も用いた。これらの径違いソケットの最小内径とテーパ角は呼び径 25 mm×13 mm で 15.0 mm,  $\theta = 46^\circ$ , 呼び径 25 mm×16 mm で 19.1 mm,  $\theta = 50^\circ$  である。水位  $h$  の変化による流量  $Q$  への影響を測定するため、呼び径 25 mm のプレーンエンド直管(ヒシパイプ HI 継手), 呼び径 50 mm の薄肉管(VP)を 100–300 mm の長さに切断し、実験に使用した。筒型流量計の最上部には、呼び径 50 mm×25 mm の径違いソケット(ヒシパイプ HI 継手), 又は呼び径 100 mm×50 mm のインクリーザ(ヒシパイプ DV 継手)を使用した。水入口側の断面積は最大で 83,213 mm<sup>2</sup>, 水出口側の断面積は 79 mm<sup>2</sup> と求められる。また、水出口側に呼び径 25 mm×16 mm の径違いソケットを装着した場合の断面積は 287 mm<sup>2</sup> である。よって式(6.4-4)の断面積比( $A_2/A_1$ )<sup>2</sup> は  $1.2 \times 10^{-5}$ – $9.0 \times 10^{-7}$  の範囲にある。実験に用いた流量計の概略図を図 6.4-6 に示す。流量計は呼び径 50 mm×25 mm の径違いソケット, プレーンエンド直管, キャップもしくは径違いソケットを上から組み立てた。また、呼び径 50 mm のキャップを用いる場合は、呼び径 100 mm×50 mm のインクリーザ, 薄肉管を用いて組み立てた。また、呼び径 25 mm のキャップに内径 24 mm のアクリルパイプを、呼び径 50 mm の場合は内径 50 mm のアクリルパイプを用いた。

実験中の写真を図 6.4-7 に示す。実験方法は、筒型流量計をスタンドに取付け、流量計上面より約 0.10 m の位置から水を内径 13 mm のビニルホースを用いて供給した。水温は 6.0–9.0 °C, 流量は  $0$ – $0.497 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  の範囲で実験を行った。水の供給を開始すると流量計内に水が溜まり、水位が上昇する。水位が一定になるまで(供給開始後 5 分程度)待ち、水位  $h$  と孔を通過する水の流量  $Q$  を測定した。水位  $h$  は図 6.4-7 に示すように、水入口側の径違いソケット又はインクリーザの内側に 5 mm 間隔の目盛りを設け、水位を 5 回測定しその平均値を求め、その値を流量計上部から下部の孔までの距離を引くことで求めた。水位は呼び径 25 mm のキャップ式においては 0.235–0.435 m, 径違いソケット式では 0.275–0.470 m, 呼び径 50 mm のキャップ式では 0.197–0.397 m の範囲で実験を行った。水をバケツに取水し、電子天秤(最小秤量値 0.01 kg)で水の質量を測定した。取水時間をストップウォッチで計り、流量を求めた。

#### 4.4 実験結果及び考察

筒型流量計の使用可否を検討するにあたり、呼び径 25 mm×13 mm,  $D = 15 \text{ mm}$ ,  $\theta = 46^\circ$  の径違いソケットをオリフィスとして使用した予備実験を行い以下の結果となる。

A1	$h = 0.473 \text{ m}$	$Q/Q_C = 0.74$
A2	$h = 0.373 \text{ m}$	$Q/Q_C = 0.78$
B1	$h = 0.337 \text{ m}$	$Q/Q_C = 0.82$
B2	$h = 0.235 \text{ m}$	$Q/Q_C = 0.89$

図 6.4-6(右)のように装置を組立て、部品の高さで水位  $h$  を変化させた。 $Q/Q_C$  は実測流量と式(6.4-5)からの計算流量との比であり、水位が高くなると  $Q/Q_C$  は小さくなる傾向が見られる。原因としてパイプ内部の摩擦を主とした各種流動抵抗が考えられる

が、 $Q/Q_c$  の値は 0.7–0.9 の範囲にあり、流量係数として考えると十分に流量測定が可能と判断した。

呼び径 25 mm のキャップにテーパ角  $\theta = 0^\circ$  としたオリフィスを設け、水位  $h$  を 0.235–0.435 m に変化させ流量測定を行った実験結果を図 6.4–8 に示す。図中の直線は式(6.4-5)から求めた計算線である。すべてのプロットは計算線と一致しておらず、大きく異なった値を示しているが、一定の傾向があり孔径の影響はみられない。図 6.4–8 のプロットにおける  $Q/Q_c$  の値は 0.59–0.67 であった。呼び径 25 mm のキャップにテーパ角  $\theta = 60^\circ$  のオリフィスを設け、水位  $h$  を 0.235–0.435 m に変化させ流量測定を行った実験結果を図 6.4–9 に示す。プロットは計算線と一致しなかったが、図 6.4–8 のような差異はなく、 $Q/Q_c$  の値は 0.75–0.91 であった。テーパ角を設けることでテーパ角を有さないデータに比べ、計算値に近づくことがわかった。孔径が大きくなるに従い、若干  $Q/Q_c$  が小さくなる傾向がみられる。また、 $D = 15$  mm に着目すると、水位の高低差によって  $Q/Q_c$  で 1 割近い差が確認され、他のデータも同様の傾向がある。テーパ角を有さないキャップによる実験値よりも流量比がやや安定しづらい。

水出口に径違いソケットを装着し、水位  $h$  を 0.275–0.470 m に変化させた場合の実験結果を図 6.4–10 に示す。呼び径 25 mm×16 mm の場合は水位  $h$  が 0.278 m 以上で水が溜まらなかったため、プロットは 1 つである。すべてのプロットが計算線と一致していないが、テーパ角付のキャップを使用した図 6.4–9 のプロットに近く、計算線に比較的近い。これらのデータの  $Q/Q_c$  は 0.82–0.91 であり、テーパ角付オリフィスを有するキャップのデータに近い値である。径違いソケット内部に存在する縮流部のテーパ角は呼び径 25 mm×13 mm で  $\theta = 46^\circ$ 、呼び径 25 mm×16 mm では  $\theta = 50^\circ$  である。前節で、オリフィス式流量計のオリフィス孔に設けたテーパ角度について検討し、 $\theta = 60^\circ$  が最適角度であることを報告した。しかし、図 6.4–10 に示された結果から径違いソケットをオリフィスとした実験において、 $\theta = 60^\circ$  と同様な結果が得られた。よって、径違いソケットをオリフィスとして用いた場合、これまでのオリフィスを用いたデータとは異なることがわかった。

図 6.4–8～10 の実験では呼び径 25 mm のキャップと径違いソケットを使用した。次に、オリフィスを呼び径 50 mm のキャップに設けたものを用意し同様の実験を行った。水の入口側には呼び径 100 mm×50 mm の排水用インクリーザを用いた。水位変化は直管の長さを変更して調整した。実験結果を図 6.4–11 に示す。呼び径 25 mm で  $\theta = 60^\circ$  のキャップを用いた図 6.4–9 のグラフと比較すると計算流量との差異は同程度であるといえる。若干特徴として挙げると、流量が  $2.3 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  付近までは  $Q/Q_c$  が 0.86–0.87 で一定の値を示したが、流量  $2.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  以上のプロットでは  $Q/Q_c$  が小さくなる傾向にある。これは、流速が増加することで気泡巻き込み量が増加し、水位測定に影響をおよぼしていたと考えられる。図 6.4–11 の結果より、気体巻き込みの影響を受けない実験として、供給を行うホースを流量計に溜められた水面に接触させることで、気体巻き込みが抑えられた。よって、その状態で図 6.4–11 と同様の実験を行

った結果を図 6.4-12 に示す。図 6.4-11 と比較し、明らかに計算流量に接近したことが示された。 $D = 13, 15 \text{ mm}$  において  $Q/Q_C$  は 0.93 程度であり、これまでの実験結果よりも、正確に水位による流量の測定が行われている結果となった。図 6.4-11 と図 6.4-12 を比較すると、 $D = 10 \text{ mm}$  で  $Q/Q_C$  は 0.88 程度とデータにほとんど変化が見られなかった。この理由として、流量が少ないために気体巻き込みの影響を受けていなかったことが挙げられる。しかし、 $D = 13, 15 \text{ mm}$  の場合よりも  $Q/Q_C$  が小さい。これは流動抵抗が大きいことを示唆している。詳細は不明であるが  $Q/Q_C$  は流量の影響を受けると考えられる。水面にホースを接触させると計算値に近い結果が得られることがわかったため、水面とホースの距離を変化させた場合について実験を行った。図 6.4-13 に装置サイズごとにプロットした実験データを示す。ホースと水面が接触させた実験 ( $L_R = 0 \text{ m}$ ) については、 $Q/Q_C$  が高い傾向があり、図 6.4-12 の結果と一致する。ホースを装置から離れた  $L_R = 0.1-0.5 \text{ m}$  については、計算流量から離れることがわかった。

次に  $h_d = 0.397 \text{ mm}$  の装置を使用し、オリフィス径を変更した場合について検討した。供給ホースと水面間距離  $L_R$  と  $Q/Q_C$  の関係について図 6.4-14 に示す。3 種とも同様な傾向を示す結果となったが図 6.4-13 の実験結果に比べ、オリフィス径によってバラツキがみられる。 $D = 15 \text{ mm}$  に注目すると、 $L_R = 0 \text{ m}$  では  $Q/Q_C$  が 1 に近いが、 $L_R = 0.1 \text{ m}$  では 0.76、 $L_R = 0.5 \text{ m}$  では 0.71 となった。それに対し  $D = 10 \text{ mm}$  では  $Q/Q_C = 0.88-0.83$  と変化が小さい。 $D = 13 \text{ mm}$  においては両データの中間的な変化を示している。オリフィス径が大きい場合、気体巻き込みの影響を受けやすいことがわかった。

呼び径 25 mm のキャップ及び装置を用いた場合の実験を行い、呼び径 50 mm の場合と比較した。 $D = 10 \text{ mm}$  とし、呼び径を変えた実験の結果を図 6.4-15 に示す。呼び径を変えた場合でも、プロットはほぼ一致することがわかった。図 6.4-16 に  $D = 15 \text{ mm}$  で呼び径を変更した実験結果を示す。呼び径 25 mm は、ホース高さが  $L_R = 0.3 \text{ m}$  以上では装置内に水が安定して溜まらなかったためデータ取得ができなかった。グラフから、ホースと水面を接触させた  $L_R = 0 \text{ m}$  のプロットに大きな差異が見られる。呼び径 50 mm のデータでは  $Q/Q_C$  が 0.93 であるのに対し、呼び径 25 mm では  $Q/Q_C$  が 1.14 となった。 $L_R = 0.1-0.2 \text{ m}$  にデータでは大きな差は見られない。

気体巻き込みによる水位への影響の検討を行うにあたり、アクリルパイプを用いた実験を行った。水位を 0.5 m となるように流量を調節し、ホースの高さを変化させその際の流量とみかけ水位を測定、同時にパイプ内部の水をバケツに取水し質量を測定した。内径 0.050 m のアクリルパイプによる実験結果を図 6.4-17 に示す。図 6.4-13 ~16 の結果と同様にホースを水面から離すと  $Q/Q_C$  が小さい値になることがわかる。また、水の質量から巻き込まれた気体が全く無いとした場合の水位を  $h_w$  として求め実測水位との比をとり、図 6.4-18 に  $Q/Q_C$  と  $h/h_w$  の関係を示す。グラフから  $Q/Q_C$  と  $h/h_w$  の間には一定の傾向がある。 $h/h_w$  の値が小さいと実測水位よりもパイプ内に水が入っていないことを示す。つまり、ホースからの空気の巻き込みによってパイプ内に水が多く存在していることとなる。実験中の写真を図 6.4-19(a) に示す。測定している

のは泡面最上部であり、パイプ内が気泡により白濁していた。次にホースを水面に接触させた場合の実験写真を図 6.4-19(b)に示す。空気はパイプ内に一切侵入しておらず、データからも実測水位と質量から計算した水位とは、ほぼ一致している。図 6.4-17,18 に示したホースの位置高さによる流量測定への影響は、水面にホースを接触させた場合が最も計算流量に近く、水位から概ね9割強の流量を得られるという結果となった。また、水面とホースの距離が離れるに従い、 $Q/Q_c$  が小さくなる傾向を示した。よって、現地用で筒型流量計を試用する際にも、水出口と水面が接触するように設計とすることが必要がある。

水中のホースの位置を変化させた実験を行い、水位への影響を確認した。長さ 0.6 m のアクリルパイプに呼び径 25 mm を装着した場合の実験結果を図 6.4-20 に示す。グラフからほぼ計算通りの流量を測定できている結果となった。 $Q/Q_c$  はほとんどの条件で 0.95–1.05 の範囲にあった。ホースの位置を 0.5 m とした実験では、水面がホースに接触する前のデータに  $Q/Q_c$  が 0.89–0.83 といった値が見られたが、これは気体巻き込みの影響であると思われ、水面に接触した際のデータは 0.98 であった。また、特にキャップからのホース位置を 0 m としたデータでは  $Q/Q_c$  が 0.94–0.96 であった。この実験条件では水中にホースを設置した際の水位は、計算流量とほぼ一致した測定が行えるという結果となった。

## 5. 結言

地下かんがいシステムを導入した圃場の地下へ導く用水流量を簡便に測定する方法の確立を目的として、水道用キャップを加工した堰式流量計、アクリル板を加工したオリフィス式流量計、水道用パイプを組み合わせた筒型流量計を作製した。作製した流量計の基本的データを屋内実験で取得し、富良野盆地地区の試験圃場で屋外実験を実施した。その結果、次の知見が得られた。

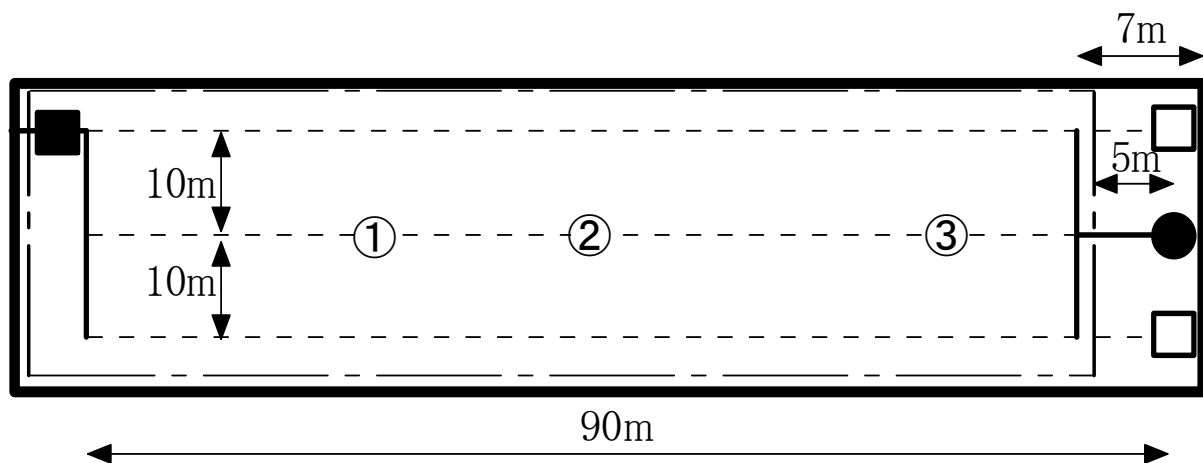
- (1) 水道用パイプキャップを加工した堰式流量計により、用水路から集中管理孔への取水流量の測定を容易に行うことが可能である。堰式流量計によって測定される流量は堰幅の 1 乗と液高さ  $H$  の 1.35–1.54 乗に比例する。堰式流量計出口付近の水面が重力の影響で低下し、流量に対する液高さのべき数が 1.5 よりも小さくなる。また、流動抵抗等によって流量係数は小さくなる。
- (2) 既設の柵の底にある用水導入口にオリフィス板を設置し、その柵に水位まで水を溜めることで導入流量を測定することが可能である。貯水する水槽のサイズを変更しても流量に影響を及ぼさない。オリフィス板を設計する場合、液高さとオリフィス径の比が 0.5 以上となるように設計する必要がある。水の入口側のオリフィス形状は流量に影響するが、出口側の形状は影響しない。テーパ角を  $60^\circ$  とした場合に、最も計算流量に近い流量を得ることができる。テーパの削り深さを変化させても流量にほぼ影響を及ぼさない。
- (3) 筒型流量計で導入流量を測定することが可能である。パイプの呼び径を変更して



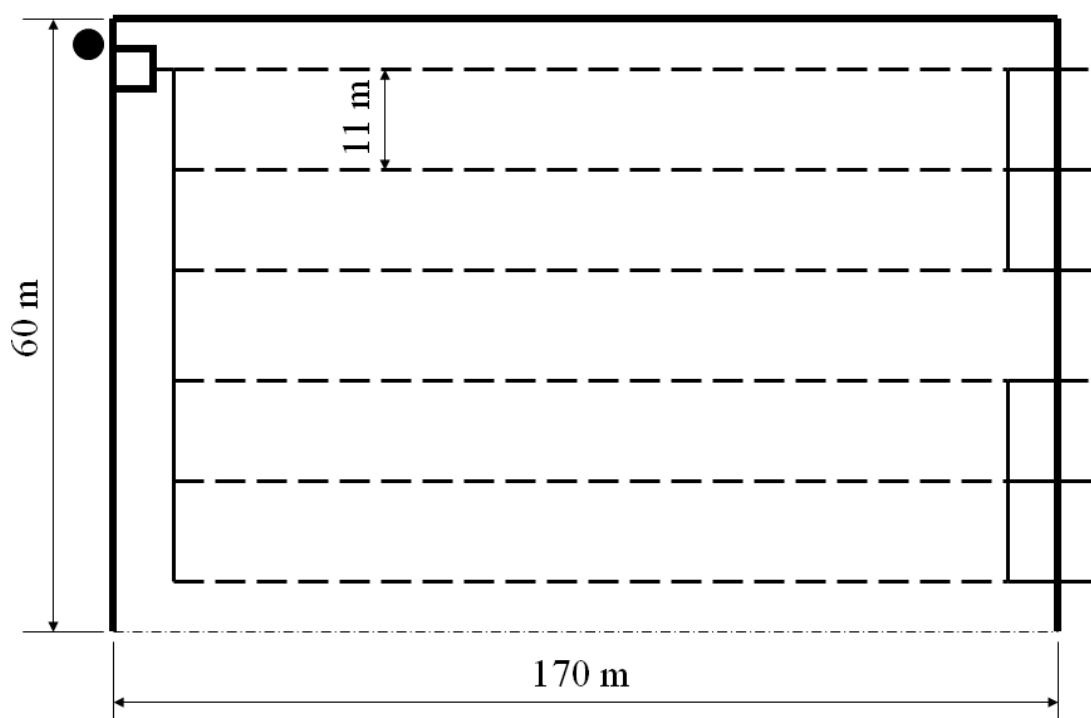
も流量に影響を及ぼさない。キャップのオリフィスに  $60^\circ$  のテーパ角を設けると、計算流量に近い流量を得ることができる。水供給用ホースを水面よりも上に設置すると気体巻き込みが生じ、流量測定に影響を及ぼす。水供給用ホースを水面よりも下に設置すると気体巻き込みが起こらない。

## 使用記号

$A$	=流出断面積	$[\text{m}^2]$
$A_0$	=オリフィス断面積	$[\text{m}^2]$
$A_1$	=筒型流量計断面積	$[\text{m}^2]$
$A_2$	=筒型流量計オリフィス断面積	$[\text{m}^2]$
$A_s$	=柵平均断面積	$[\text{m}^2]$
$D$	=オリフィス孔径	$[\text{m}]$
$g$	=重力加速度	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
$h$	=水位	$[\text{m}]$
$H$	=堰を通過する液高さ	$[\text{m}]$
$h_0$	=初期水位	$[\text{m}]$
$h_d$	=装置高	$[\text{m}]$
$h_w$	=水質量から求めた計算水位	$[\text{m}]$
$K$	=抵抗係数	$[-]$
$K_i$	=流量係数	$[\text{m}^{2-n} \cdot \text{s}^{-1}]$
$L$	=テーパー削り深さ	$[\text{m}]$
$L_m$	=柵一辺の平均長さ	$[\text{m}]$
$L_R$	=ホースと水面の距離	$[\text{m}]$
$n$	=液高さ $H$ のべき数	$[-]$
$Q$	=流量	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
$Q_c$	=抵抗等が無い場合の計算流量値	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
$t$	=時間	$[\text{s}]$
$u$	=流速	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$u_s$	=水面降下速度	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$W$	=堰幅	$[\text{m}]$
$\Delta H$	=重力による水面低下距離	$[\text{m}]$
$\Delta P$	=圧力損失	$[\text{Pa}]$
$\rho$	=密度	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
$\pi$	=円周率	$[-]$
$\theta$	=角度	$[\text{deg}]$



(A) 試験圃場 A



(B) 試験圃場 B

図 6.2-1 試験圃場俯瞰図

一点鎖線：遮水シート 破線：暗渠管 実線：導水管・連絡管

■：集中管理孔 □：ネジ式水閘 ●水平水閘 ①②③観測孔

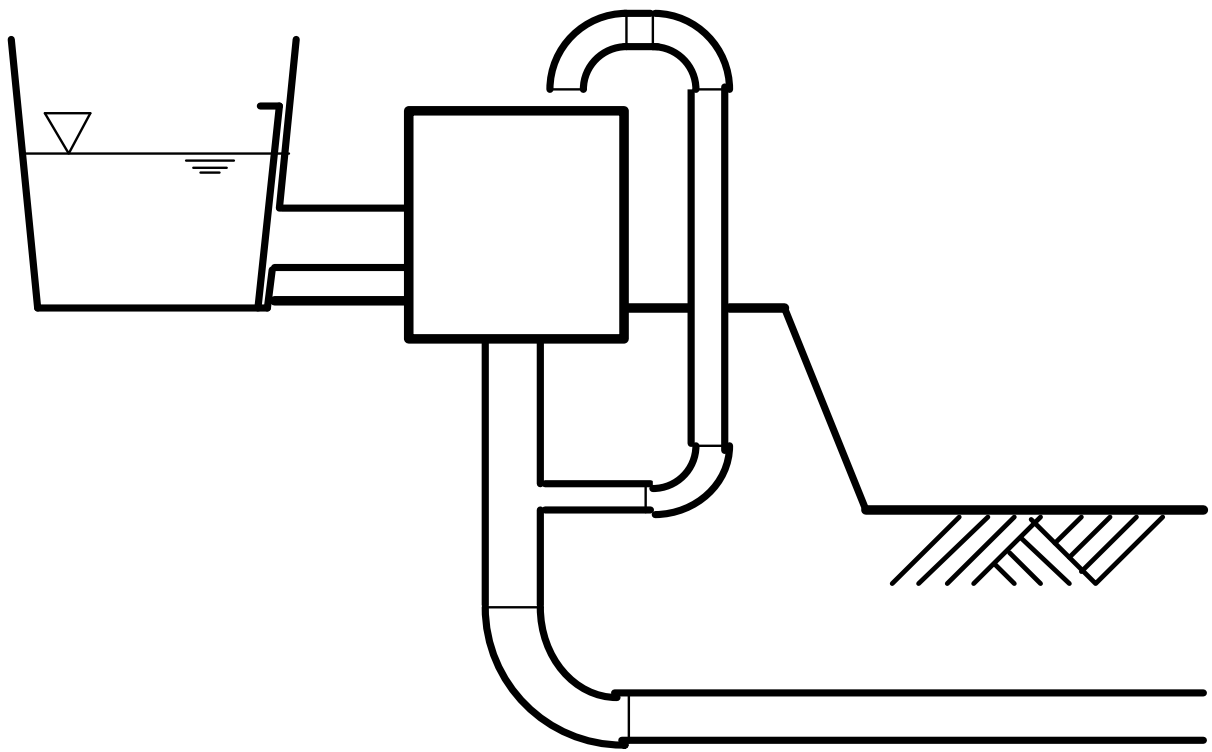


図 6.2-2 集中管理孔システム(開水路タイプ)

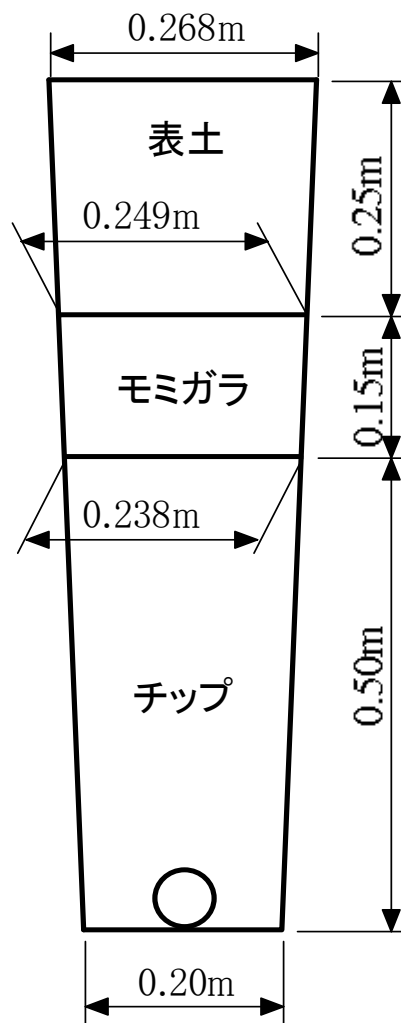


図 6.2-3 集水渠断面図(標準施工)

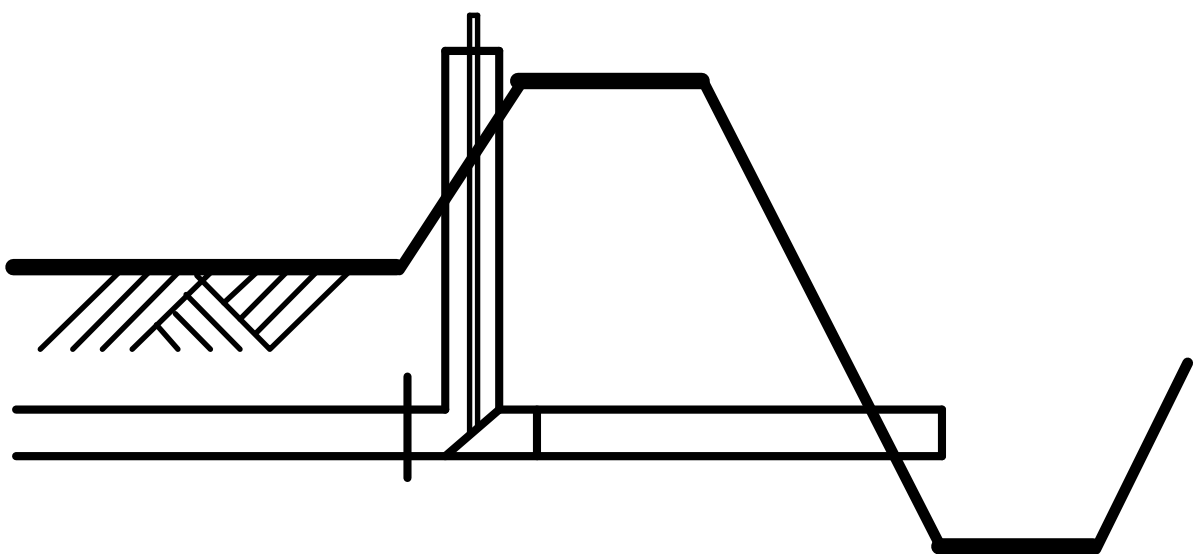


図 6.2-4 水平水閘標準図

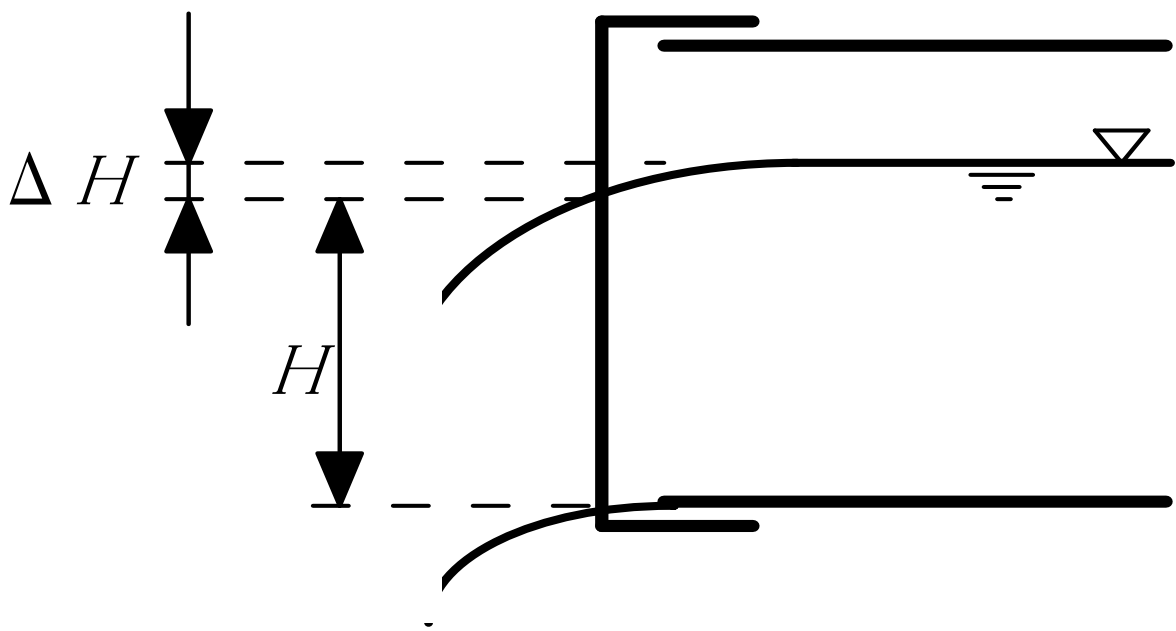


図 6.2-5 堰式流量計による液高さ  $H$  の測定法



写真 6.2-1 堰式流量計(呼び径 125 mm)



写真 6.2-2 流量検定用パイプライン(呼び径 75 mm)



写真 6.2-3 試験圃場の分水楯

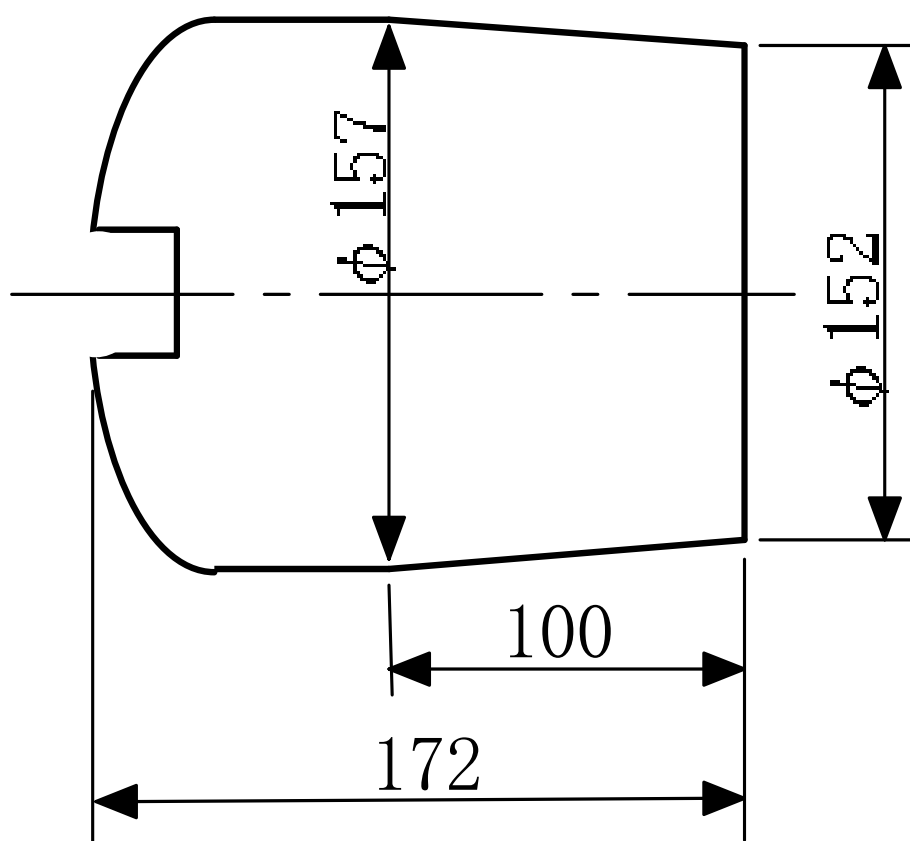


写真 6.2-4 屋外実験用堰式流量計(呼び径 125 mm キャップ)





写真 6.2-5 流量検定(呼び径 75 mm, 流量  $0.35 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ )

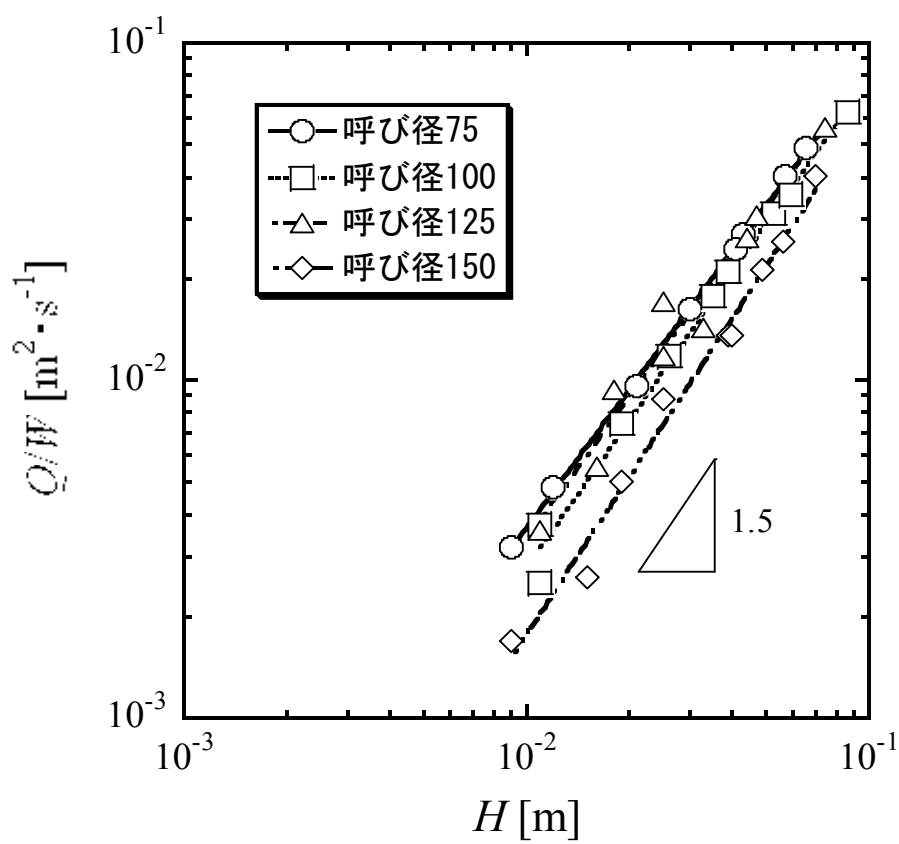


図 6.2-6 流量  $Q$  と液高さ  $H$  の関係

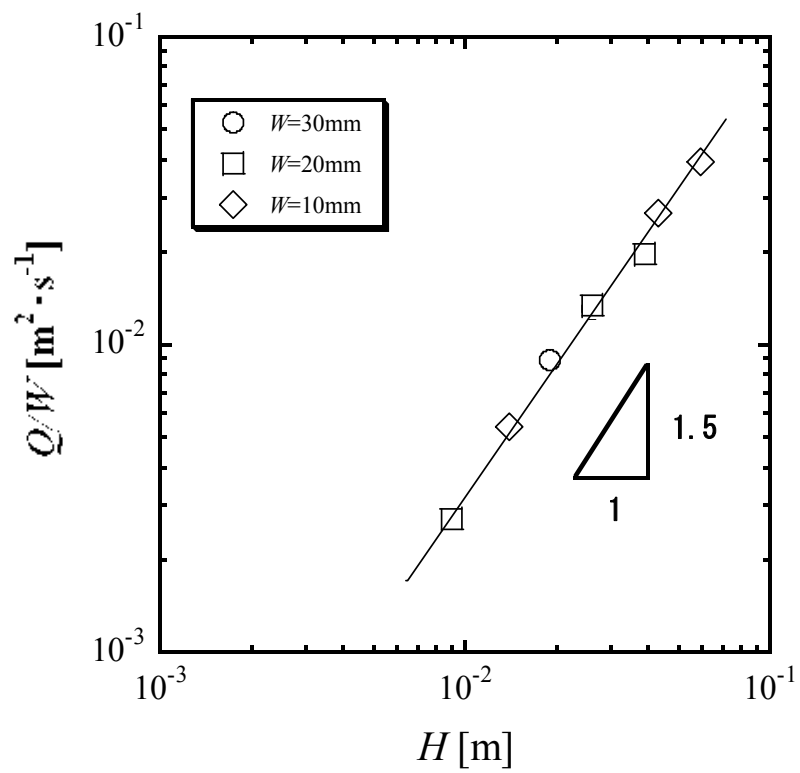


図 6.2-7 屋外用堰式流量計の検定結果(呼び径 125 mm)

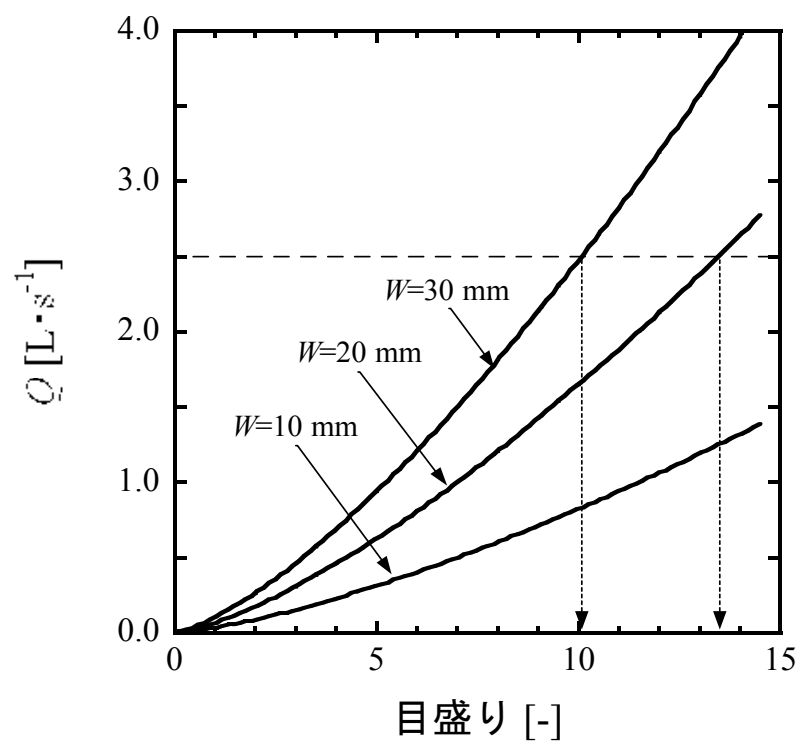


図 6.2-8 屋外用堰式流量計の検量線(呼び径 125 mm)



写真 6.2-6 過剰流量で導水した地下かんがい圃場表面(平成 17 年春，水田圃場)



写真 6.2-7 屋外実験用堰式流量計を用いた取水試験(呼び径 125 mm，堰幅 20 mm)

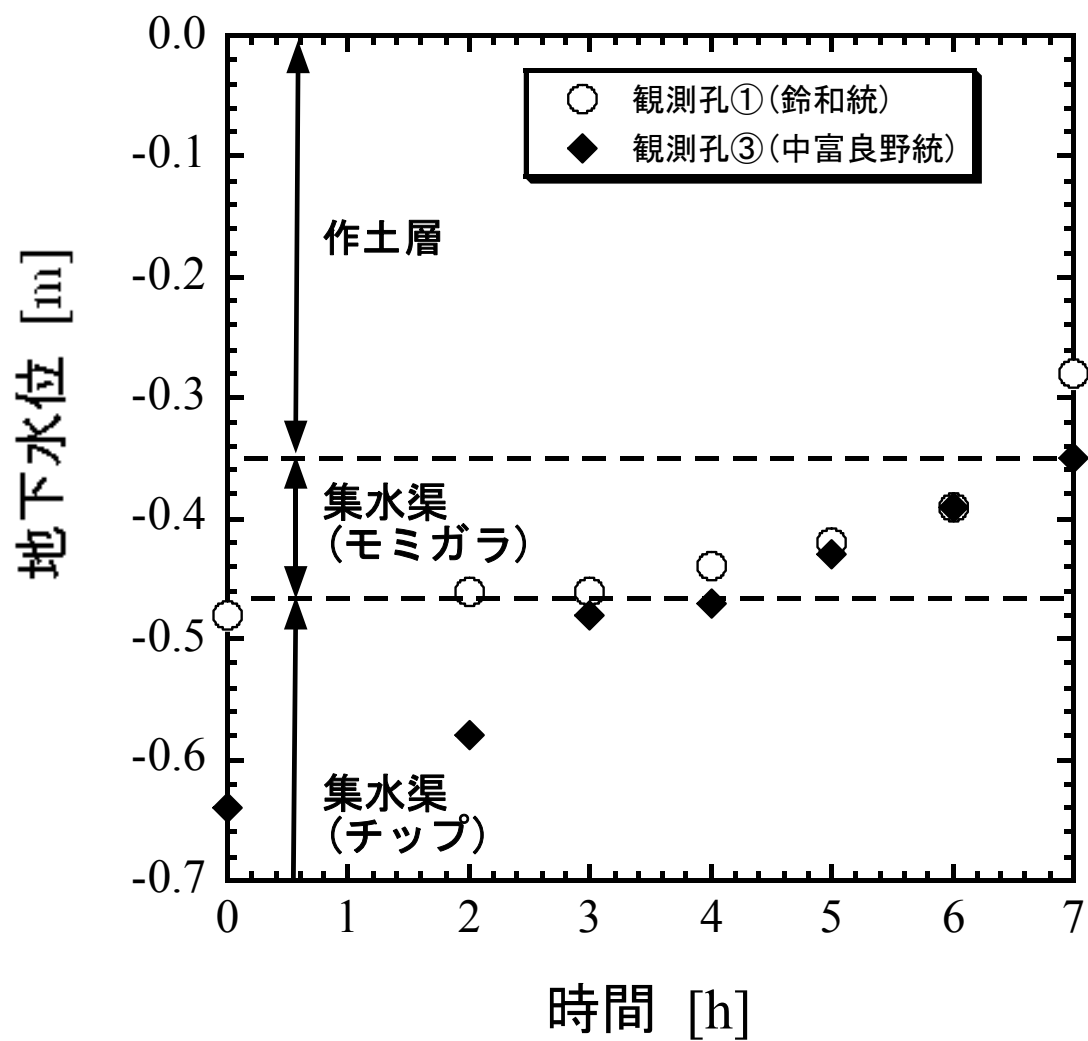


図 6.2-9 用水導入に伴う試験圃場の地下水位変化

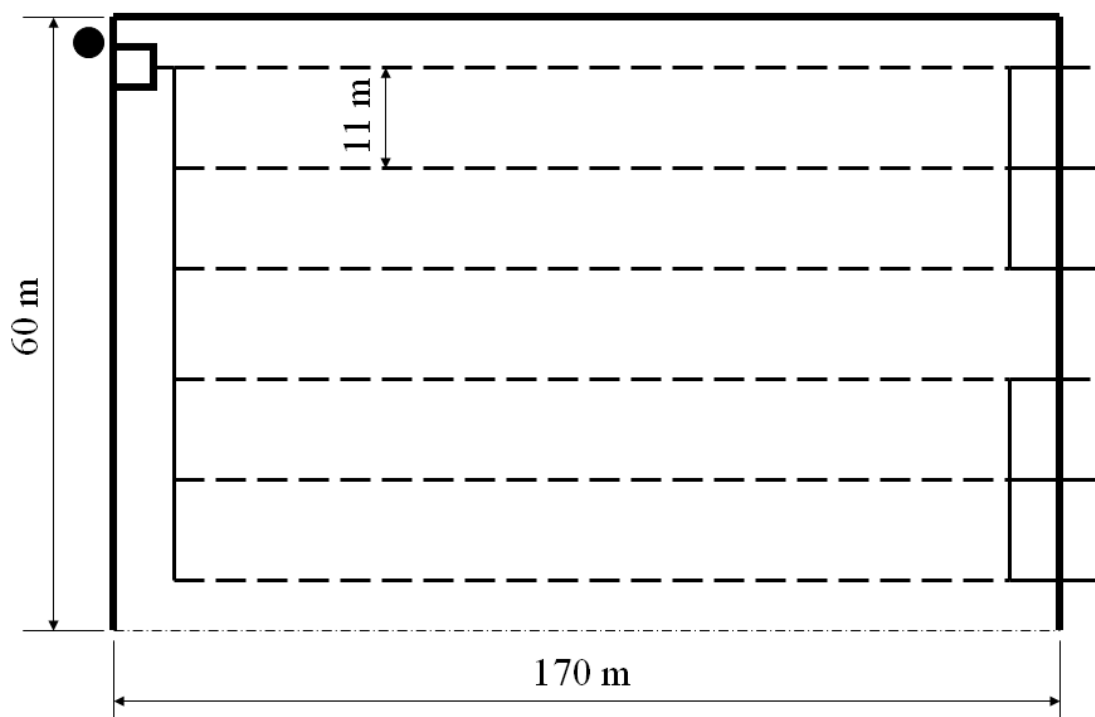


図 6.3-1 試験圃場俯瞰図(●で開水路型用水路に接続)

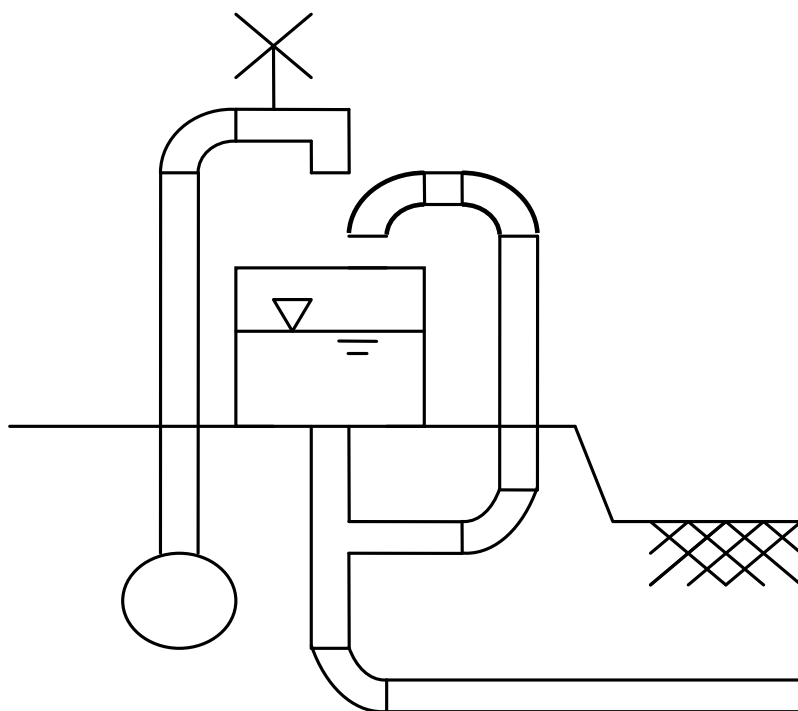


図 6.3-2 地下かんがいシステム(開水路型)





写真 6.3-1 閉水路型集中管理孔

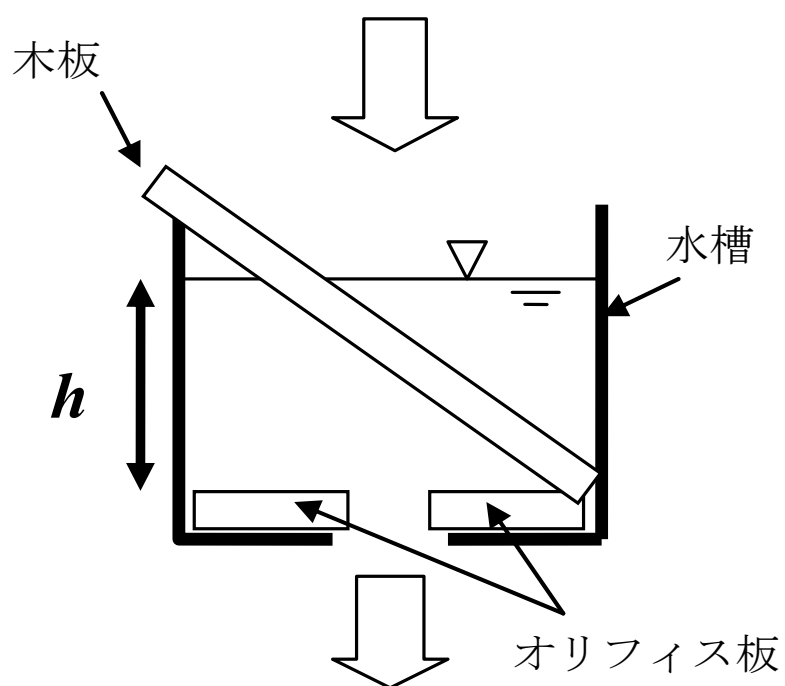


図 6.3-3 実験装置図

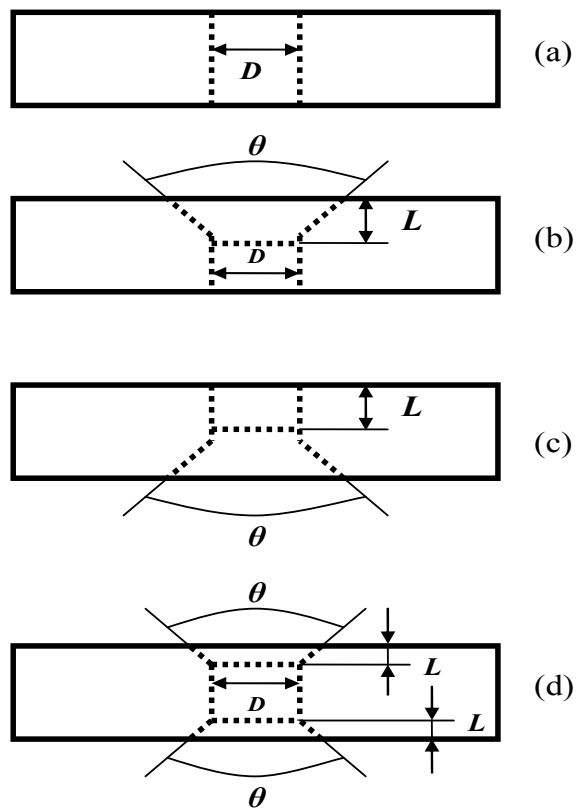


図 6.3-4 オリフィス形状

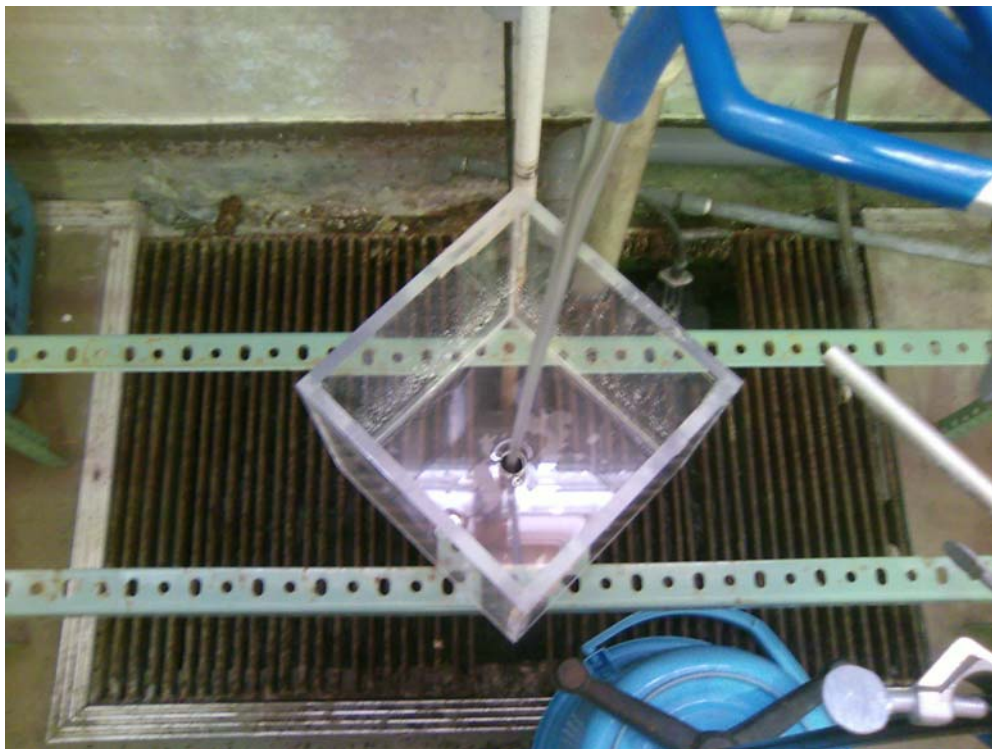


写真 6.3-2 減勢用木板未使用時

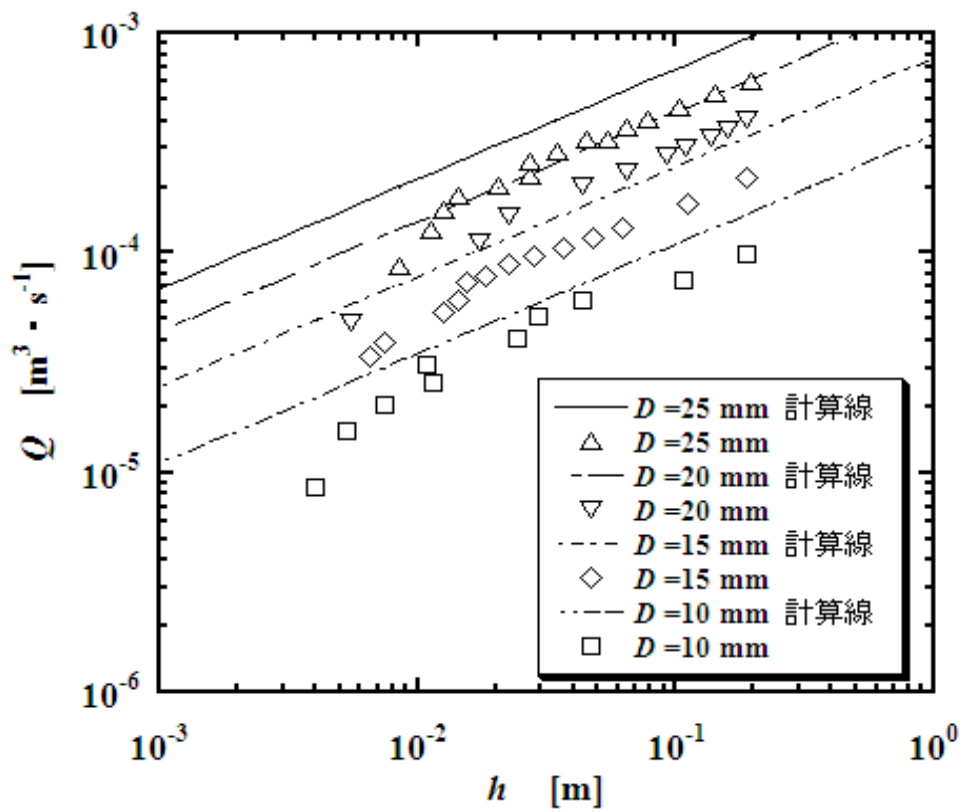


図 6.3-5 流量  $Q$  と水位  $h$  の関係(180×180 mm)

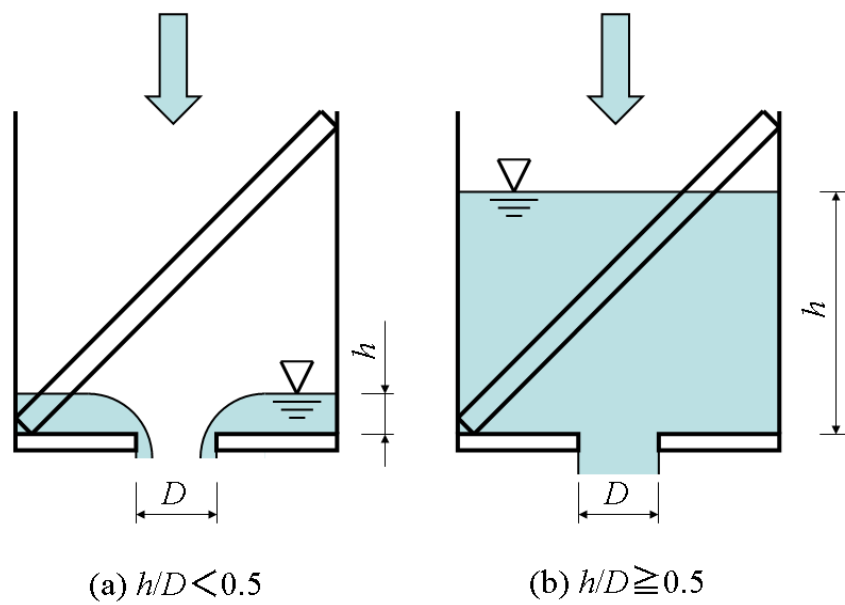


図 6.3-6 オリフィス付近の流れと  $h/D$  の関係



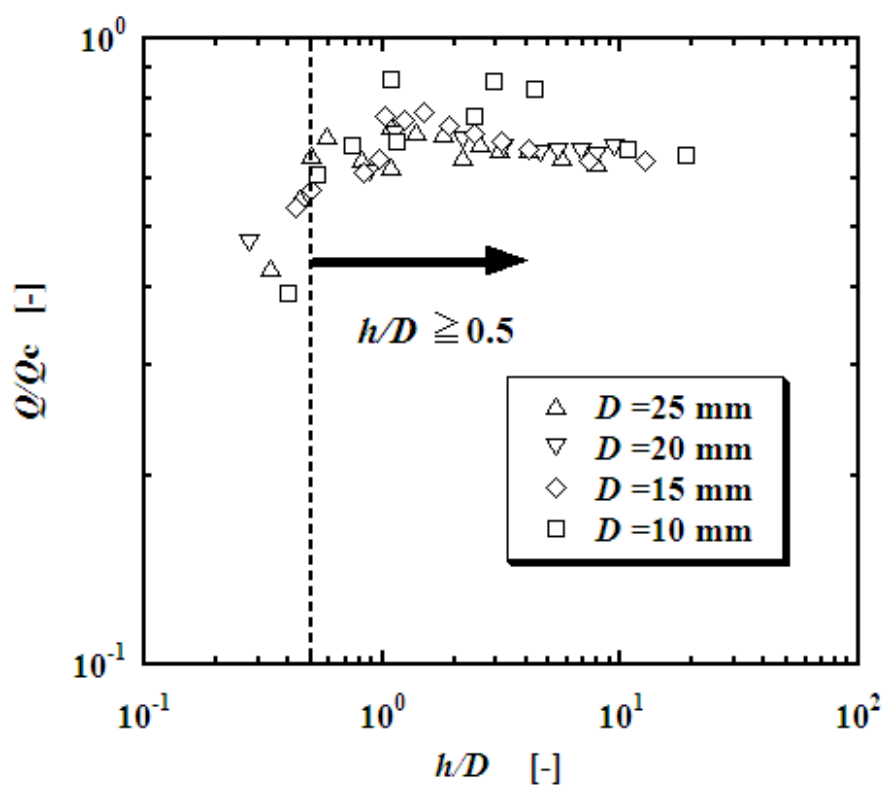


図 6.3-7  $Q/Q_c$  と  $h/D$  の関係(180×180 mm)

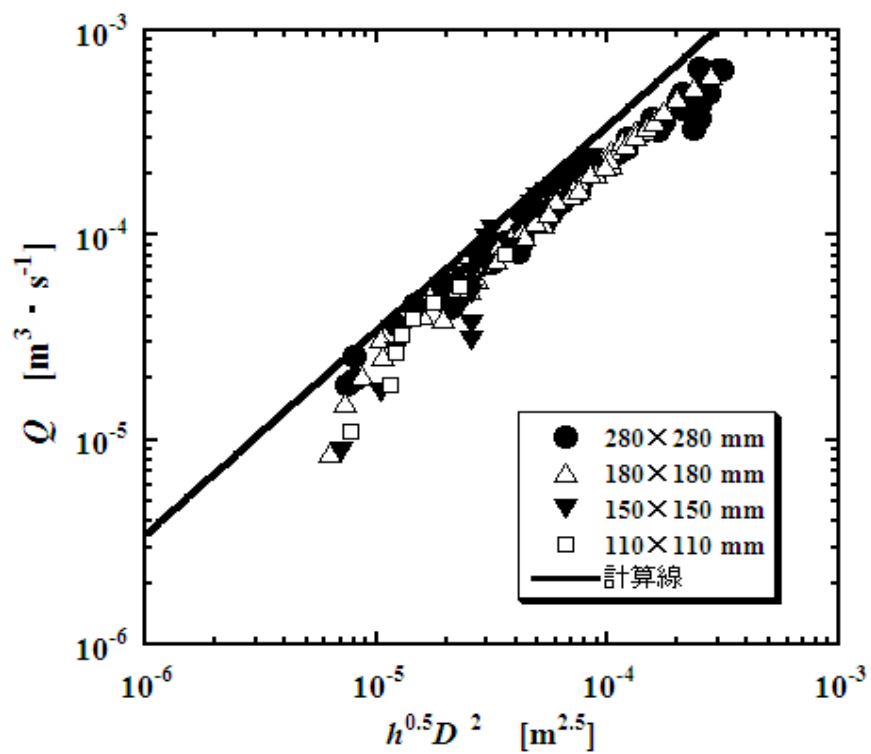


図 6.3-8 流量  $Q$  と  $h^{0.5}D^2$  の関係( $h/D \geq 0.5$ )

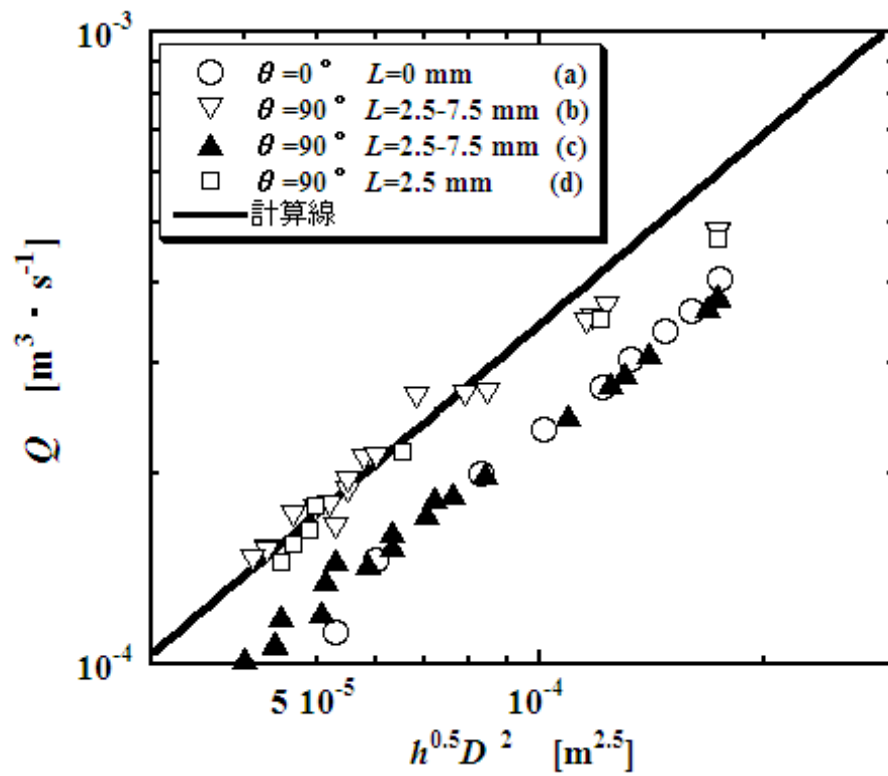


図 6.3-9 流量  $Q$  と  $h^{0.5}D^2$  の関係( $h/D \geq 0.5$ )

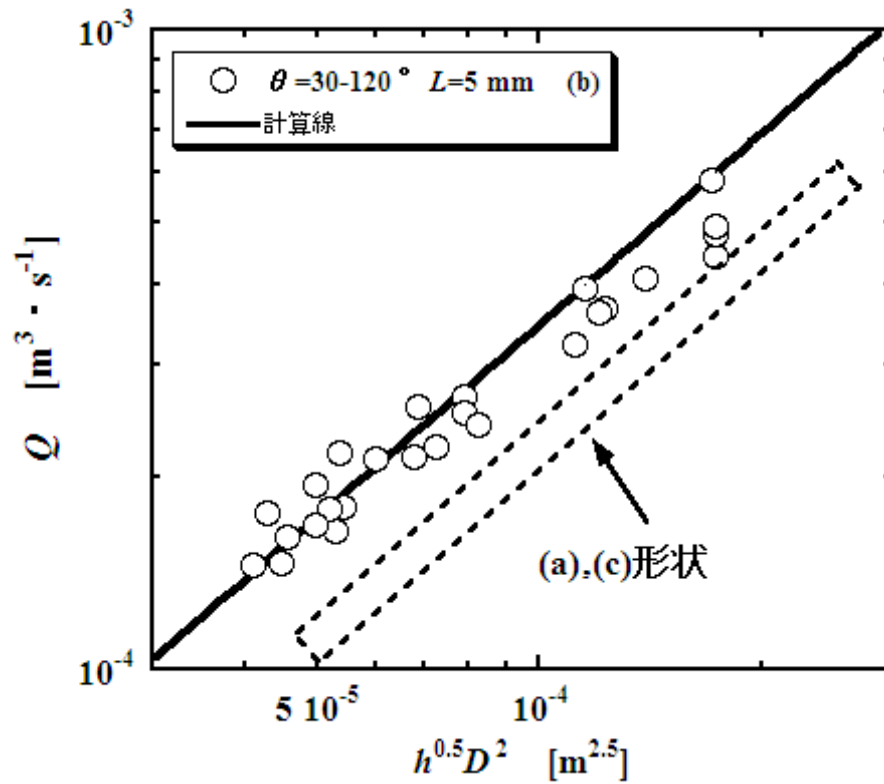


図 6.3-10 流量  $Q$  と  $h^{0.5}D^2$  の関係( $h/D \geq 0.5$ )

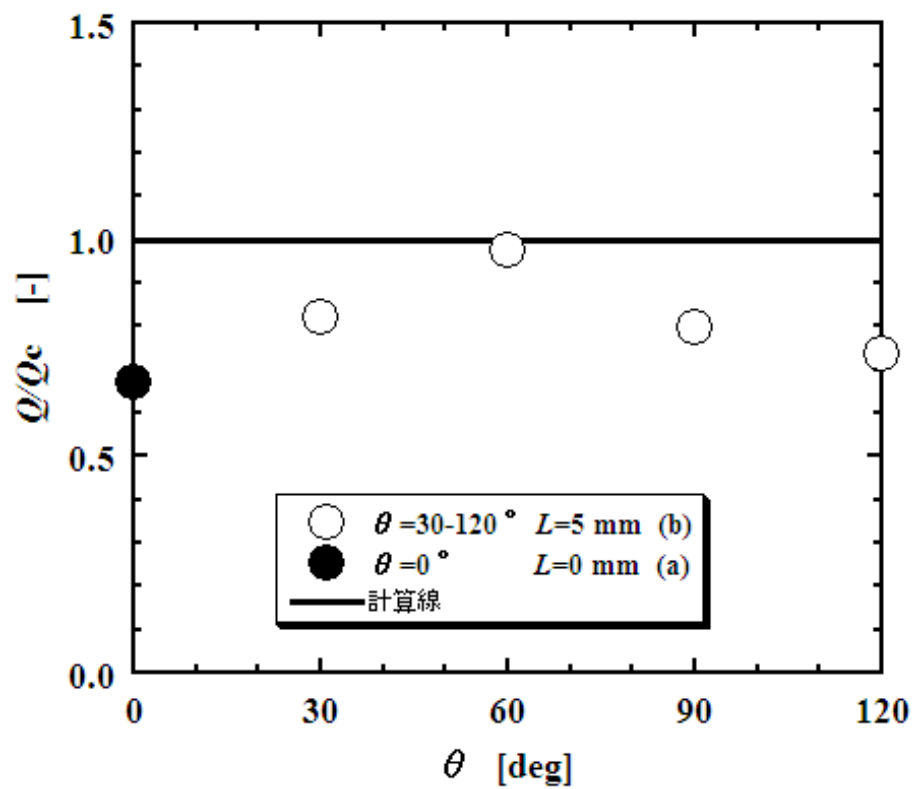


図 6.3-11 流量比  $Q/Q_c$  とテーパ角  $\theta$  の関係

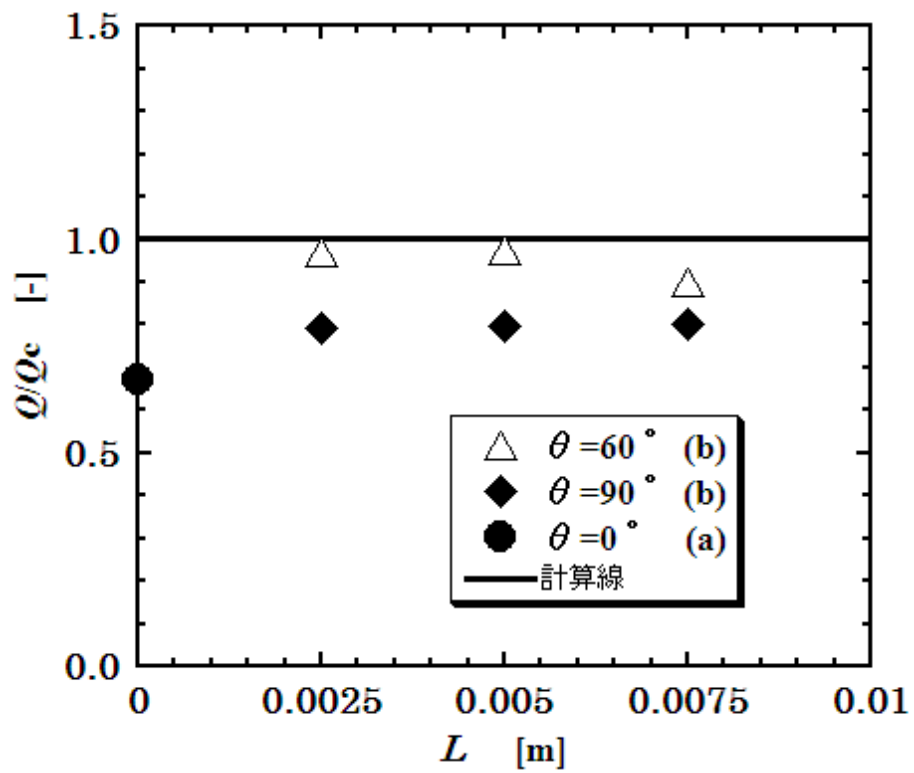


図 6.3-12 流量比  $Q/Q_c$  と削り深さ  $L$  の関係

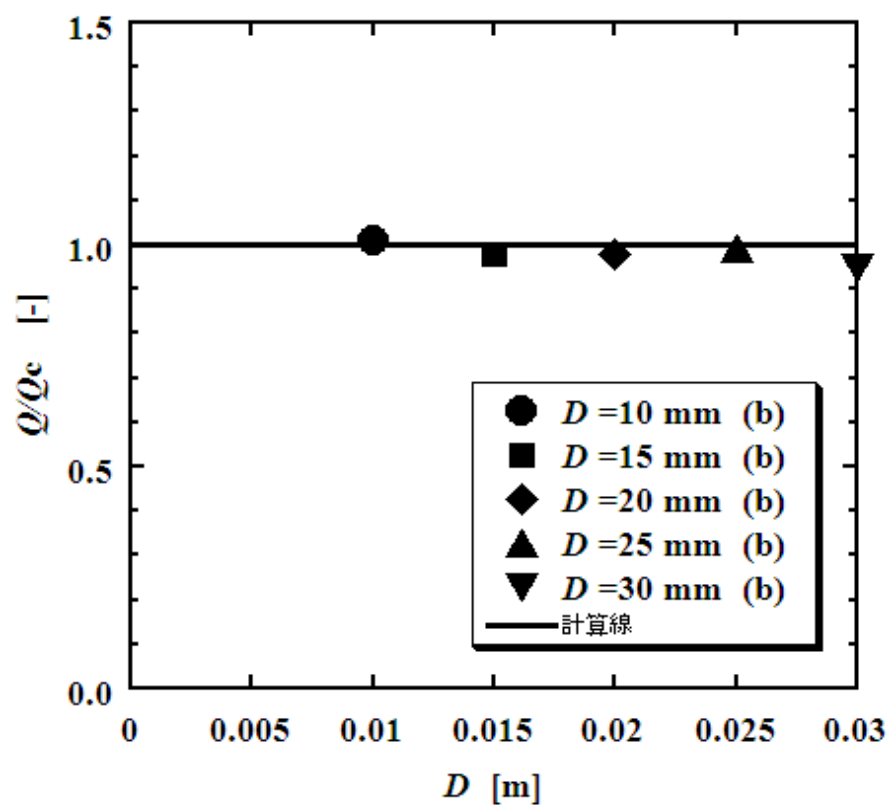


図 6.3-13 流量比  $Q/Q_c$  とオリフィス孔径  $D$  の関係( $\theta=60^\circ$ )

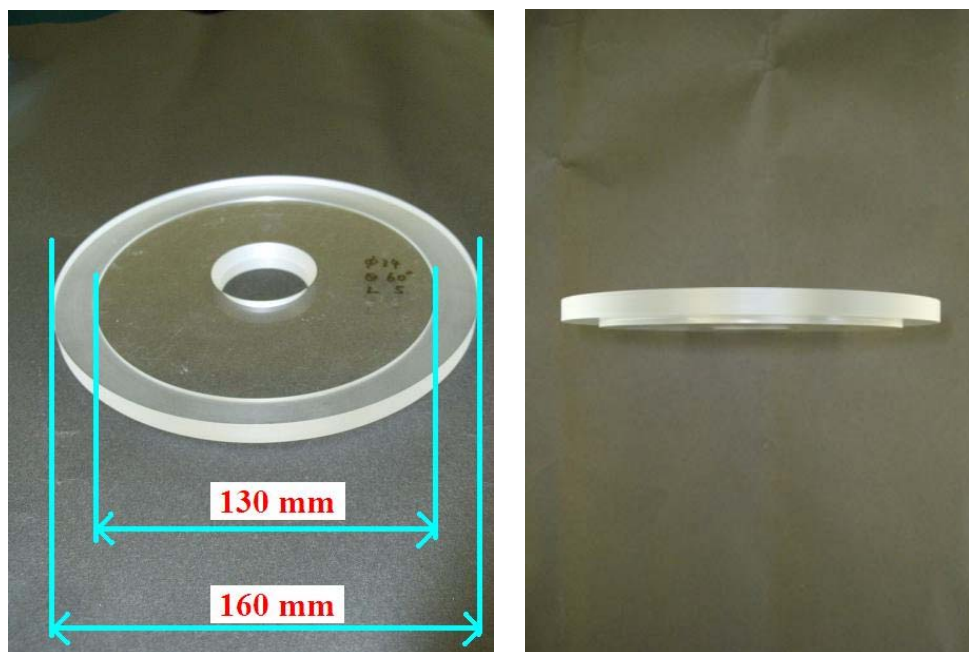


写真 6.3-3 試験圃場用オリフィス板



写真 6.3-4 現地試験(オリフィス板設置状況)



写真 6.3-5 現地試験(導水試験中)



図 6.4-1 設置柵

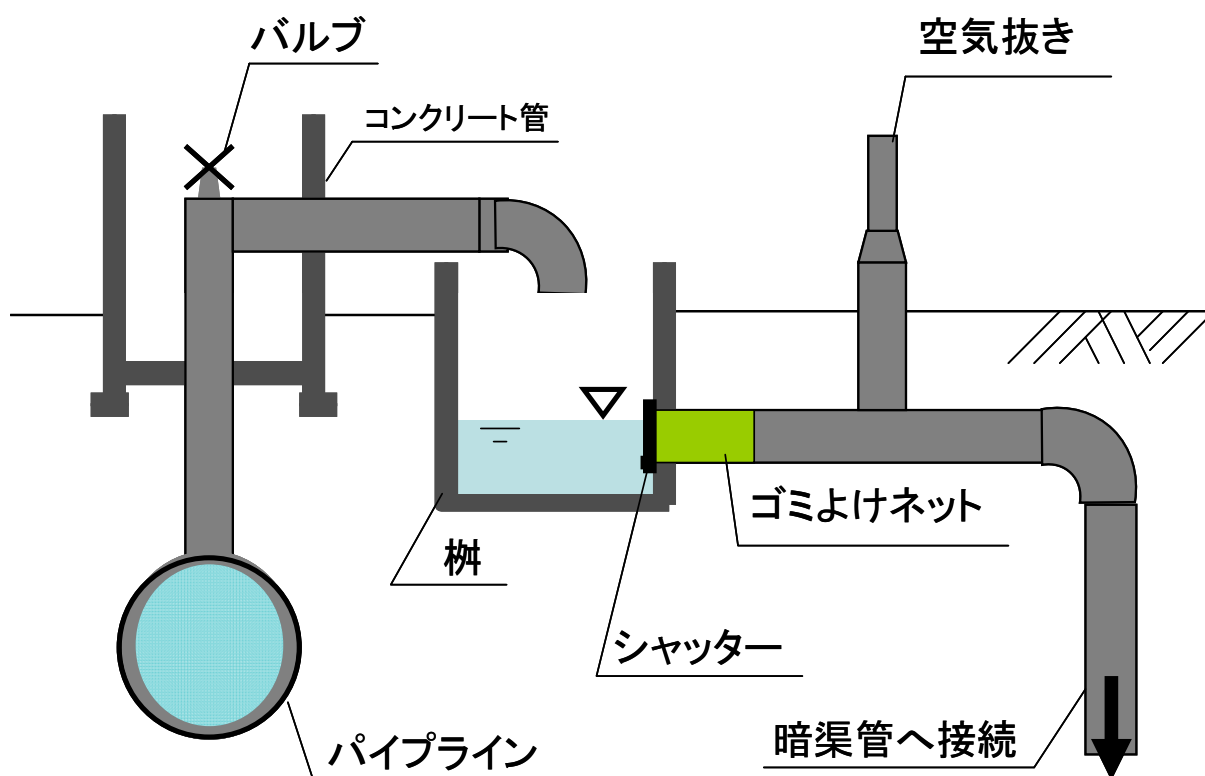


図 6.4-2 閉水路型地下かんがいシステム集中管理孔



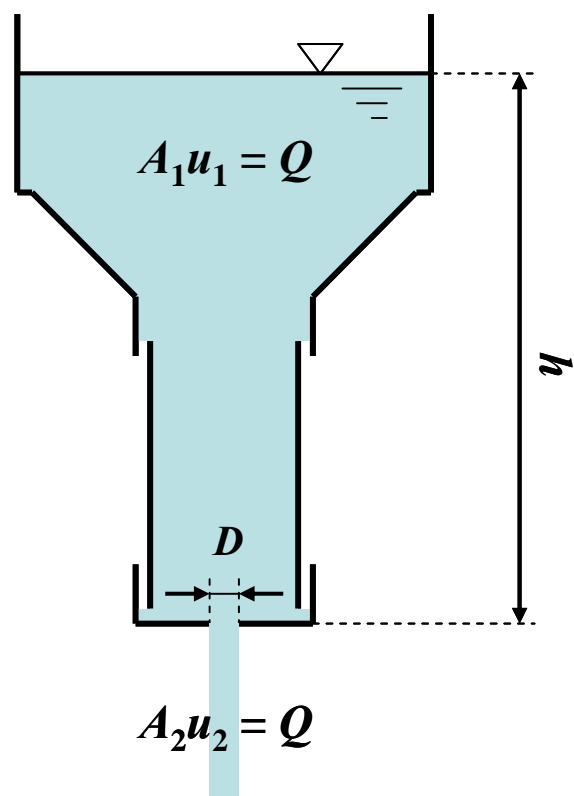


図 6.4-3 筒型流量計断面図



図 6.4-4 孔付き水道用キャップ(呼び径 25 mm,  $\theta=0^\circ$ )

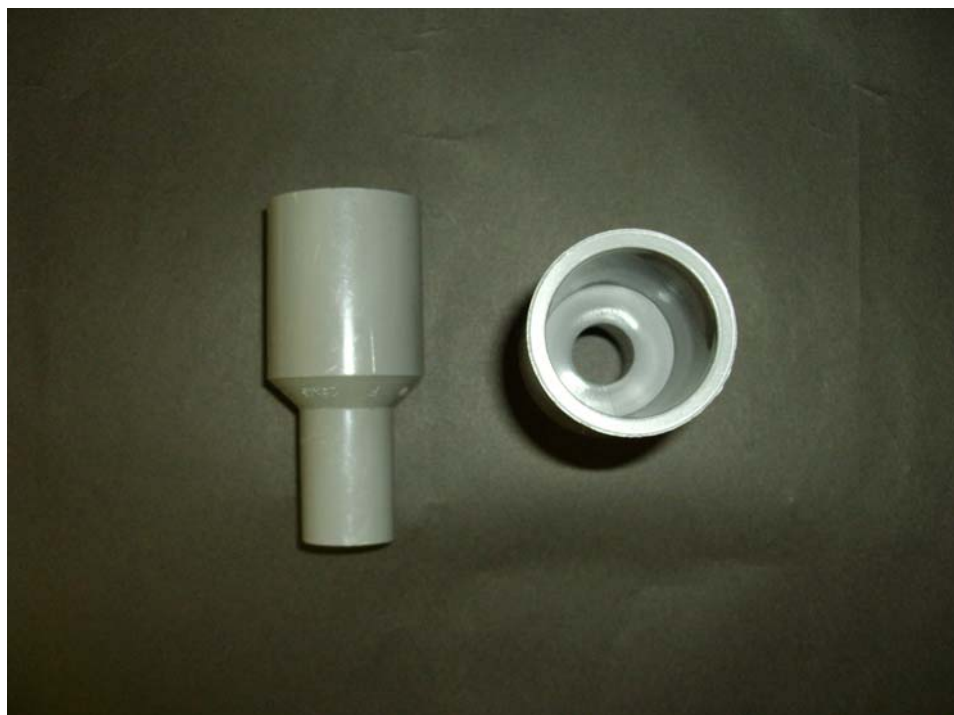


図 6.4-5 径違いソケット(呼び径 25 mm×13 mm)

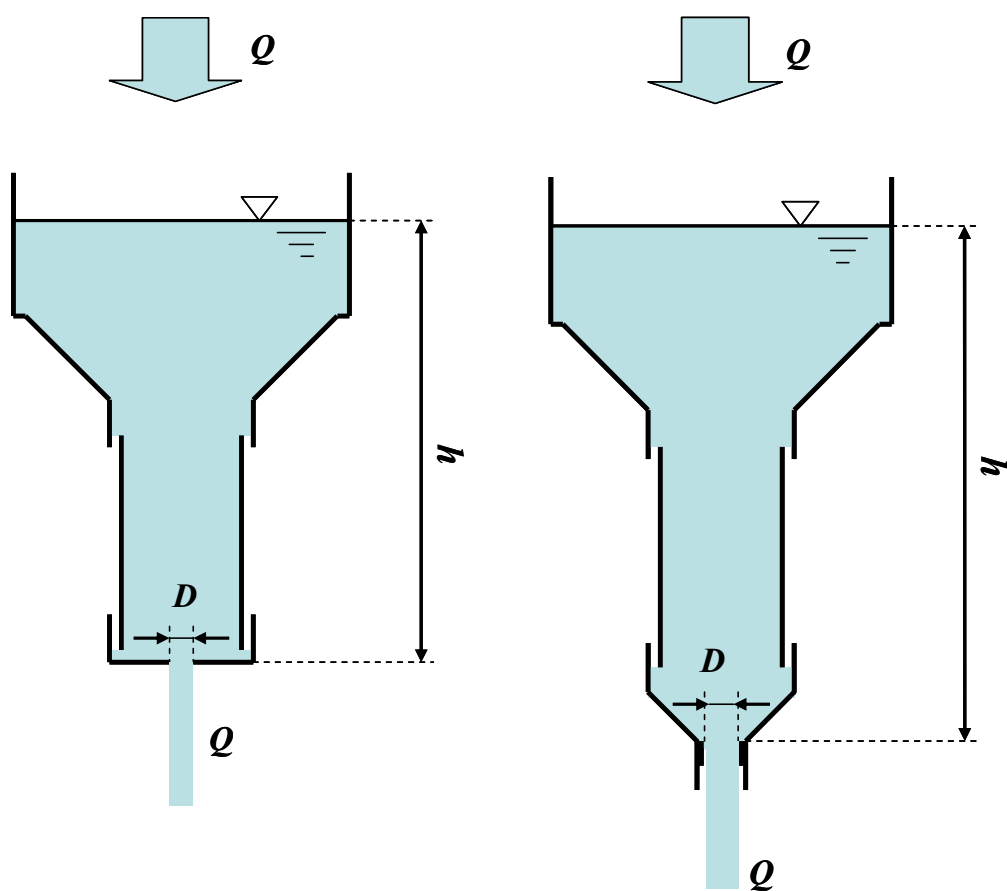


図 6.4-6 実験装置図概略図





図 6.4-7 ホースの先端を水面に接触させた実験

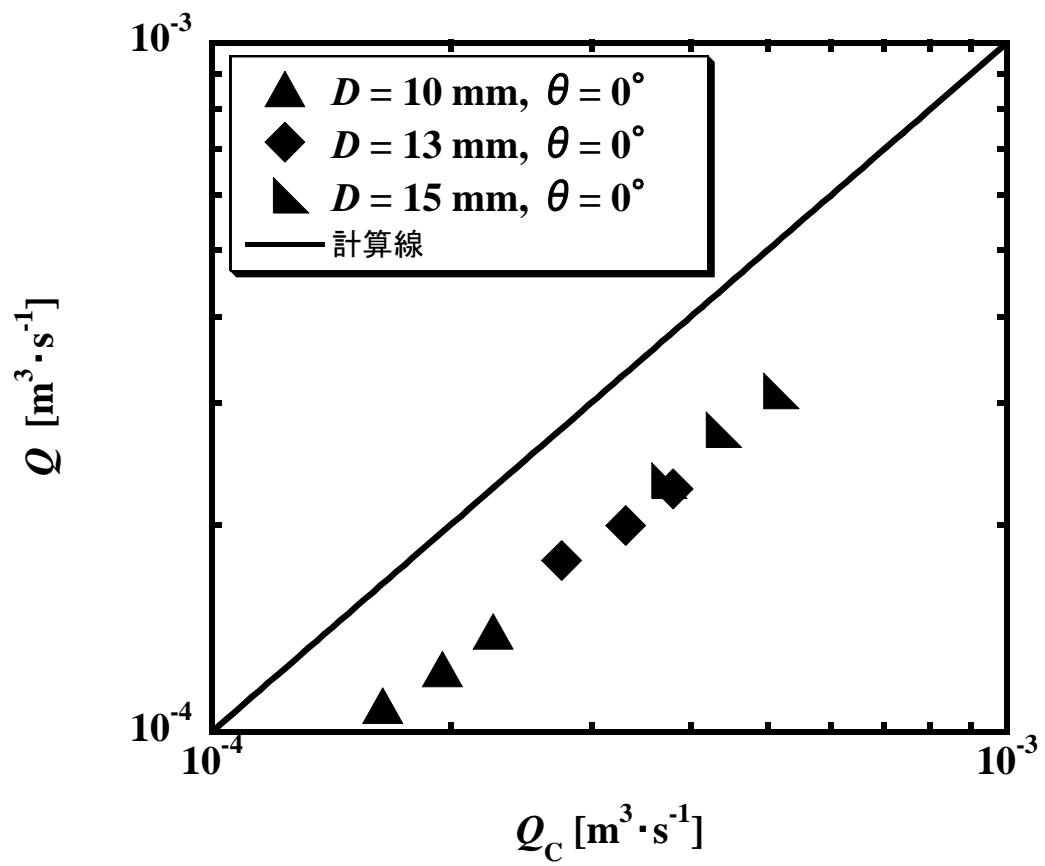


図 6.4-8 孔付きキャップ( $\theta=0^\circ$ )を用いた場合

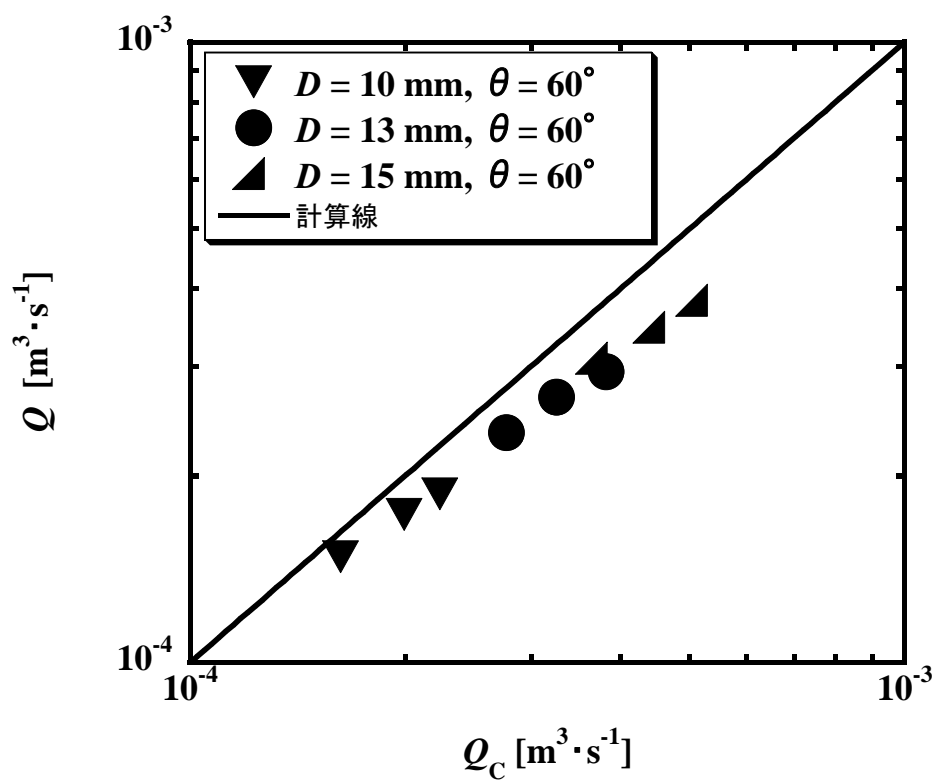


図 6.4-9 孔付きキャップ( $\theta=60^\circ$ )を用いた場合

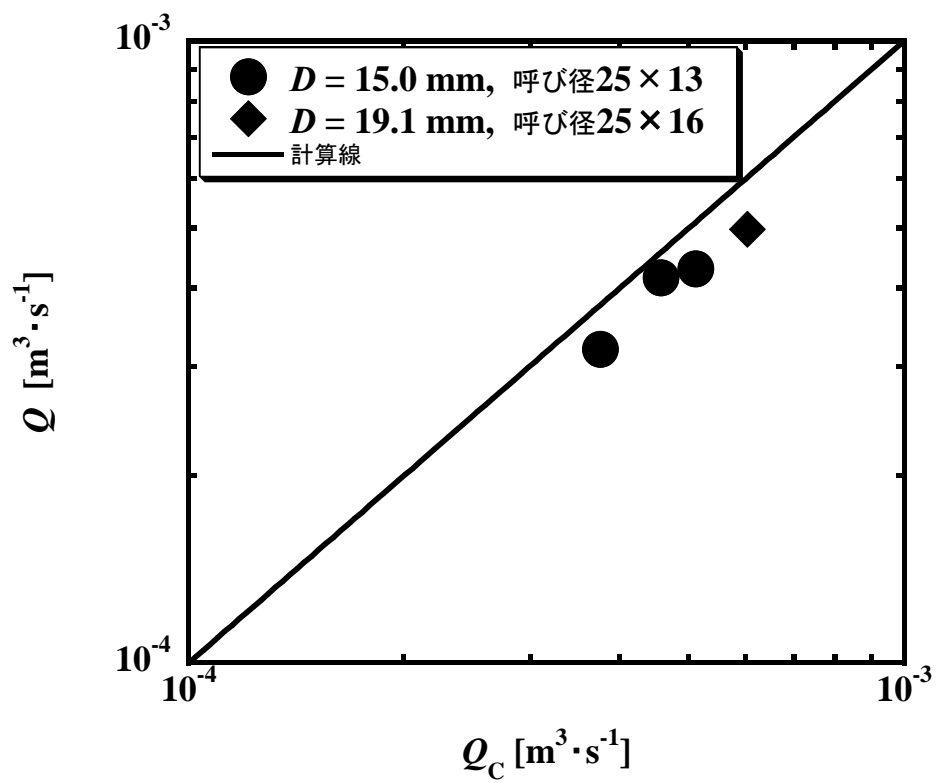


図 6.4-10 径違いソケットを用いた場合

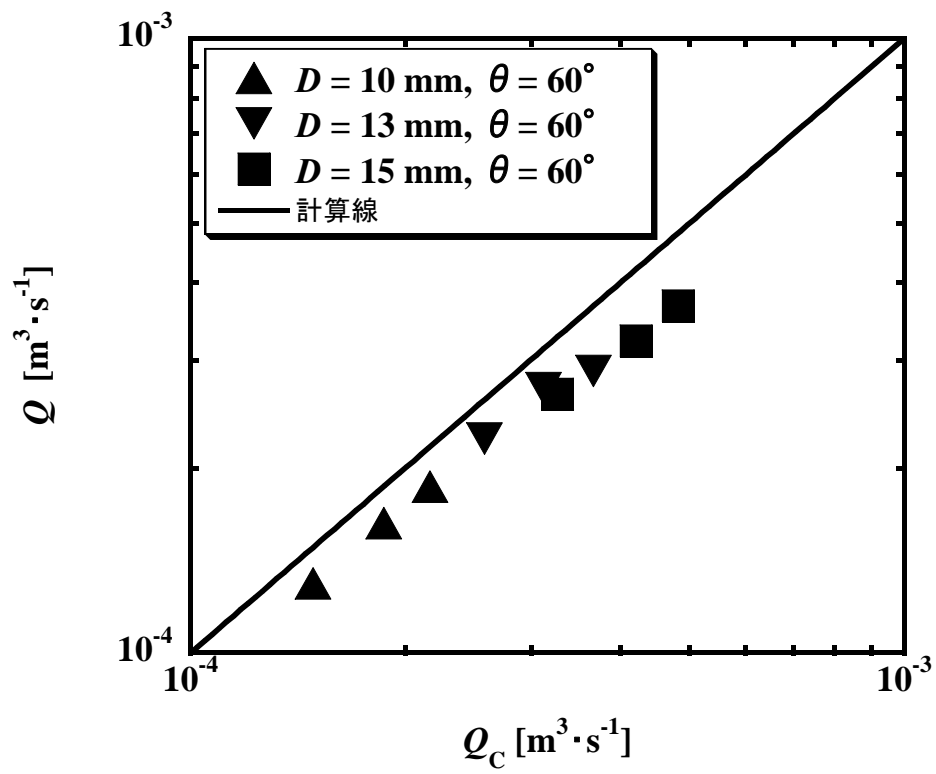


図 6.4-11 孔付きキャップ(呼び径 50 mm,  $\theta=60^\circ$ )を用いた場合

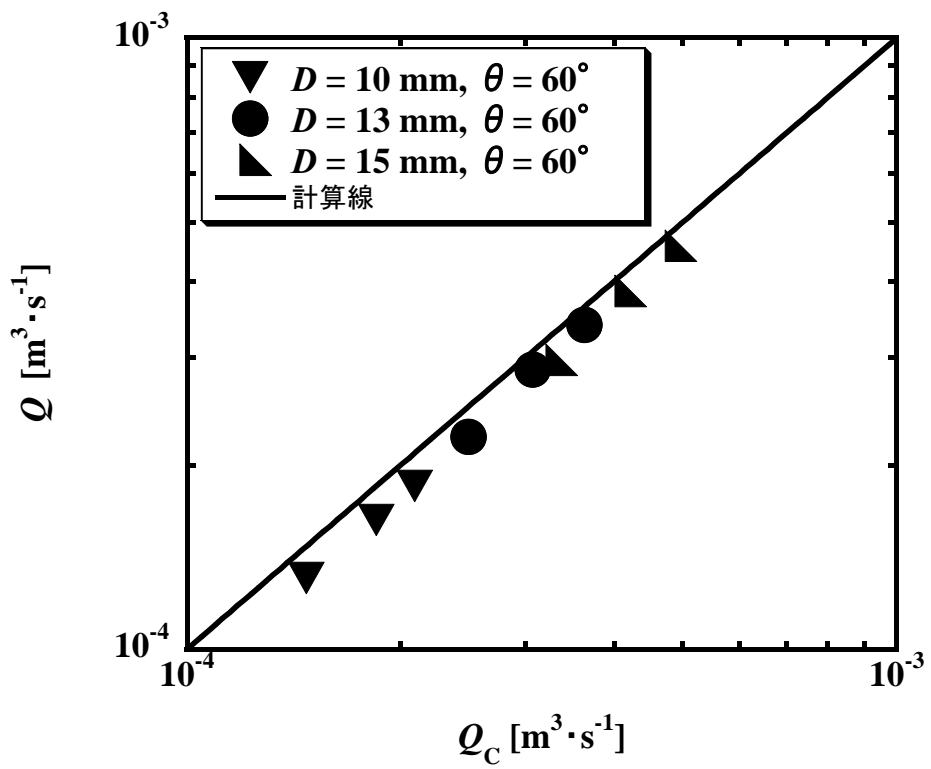


図 6.4-12 ホースを水面下にした場合(呼び径 50 mm,  $L_R = 0$  m)

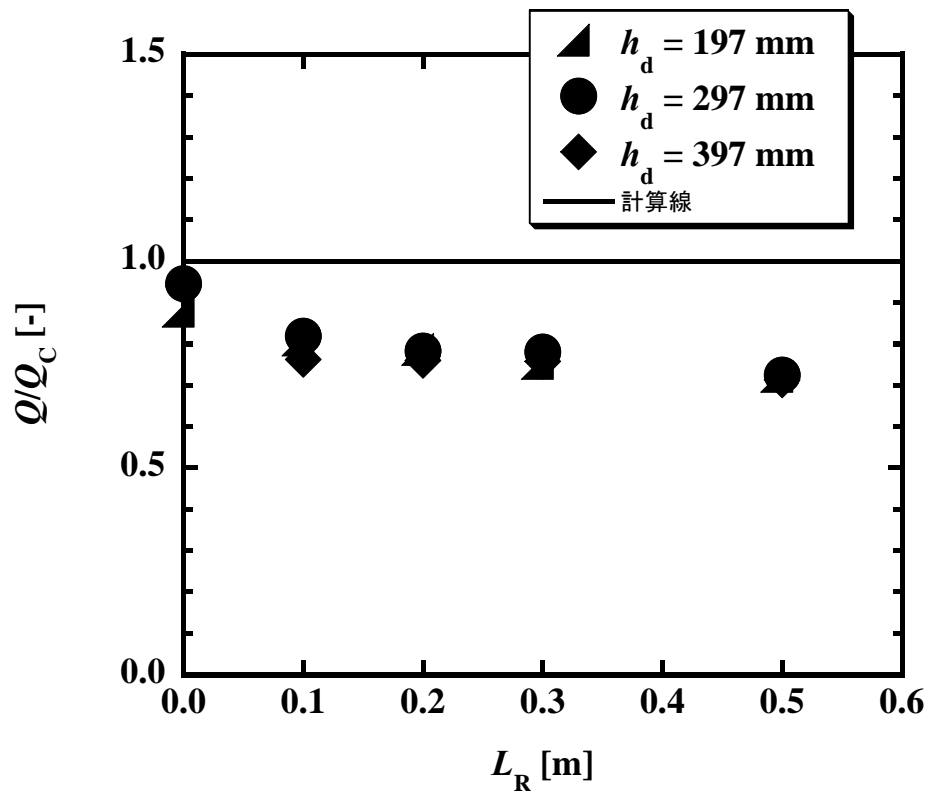


図 6.4-13 ホース高さ  $L_R$  の影響(呼び径 50 mm,  $D = 15$  mm,  $\theta = 60^\circ$ )

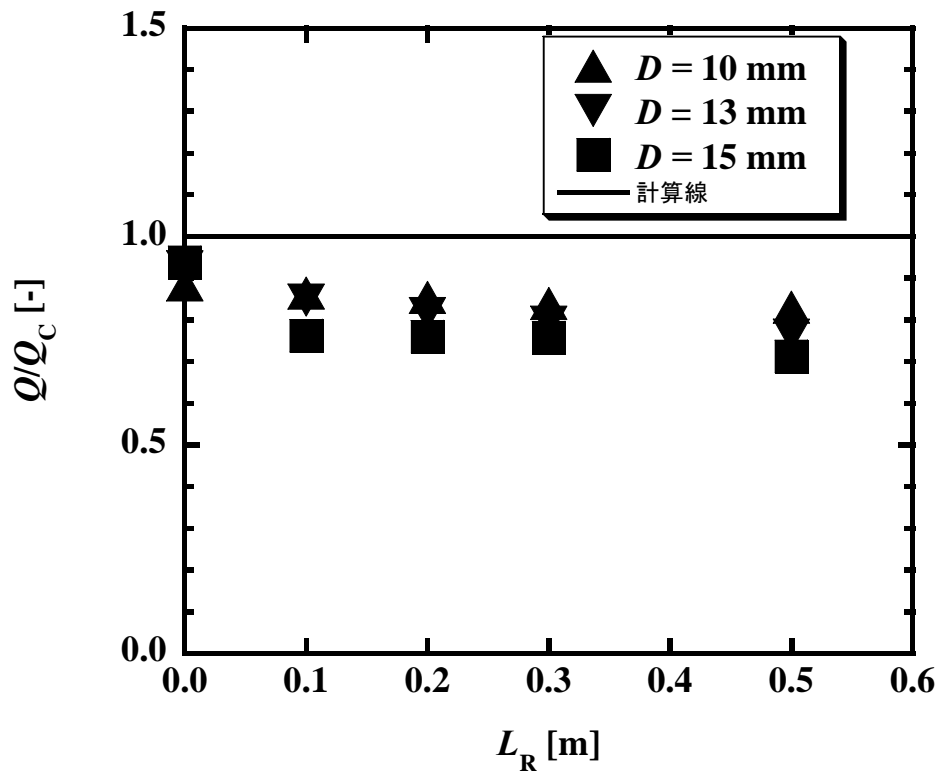


図 6.4-14 オリフィス径の影響(呼び径 50 mm,  $h = 0.39$  m,  $\theta = 60^\circ$ )

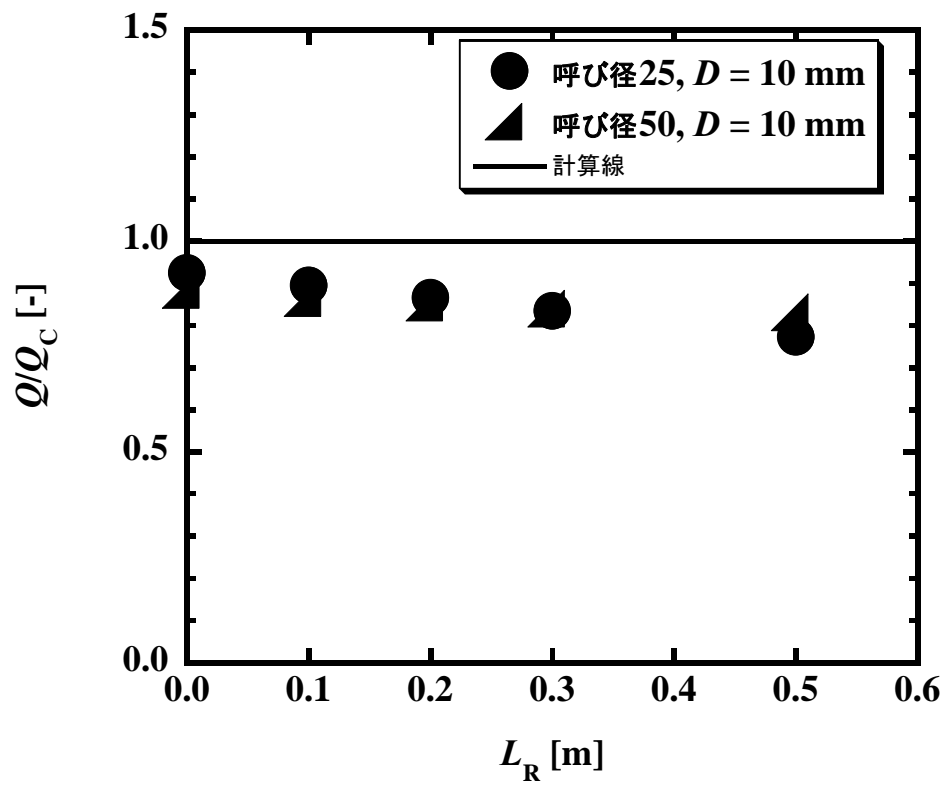


図 6.4-15 装置内径の影響( $h = 0.39$  m,  $\theta = 60^\circ$ )

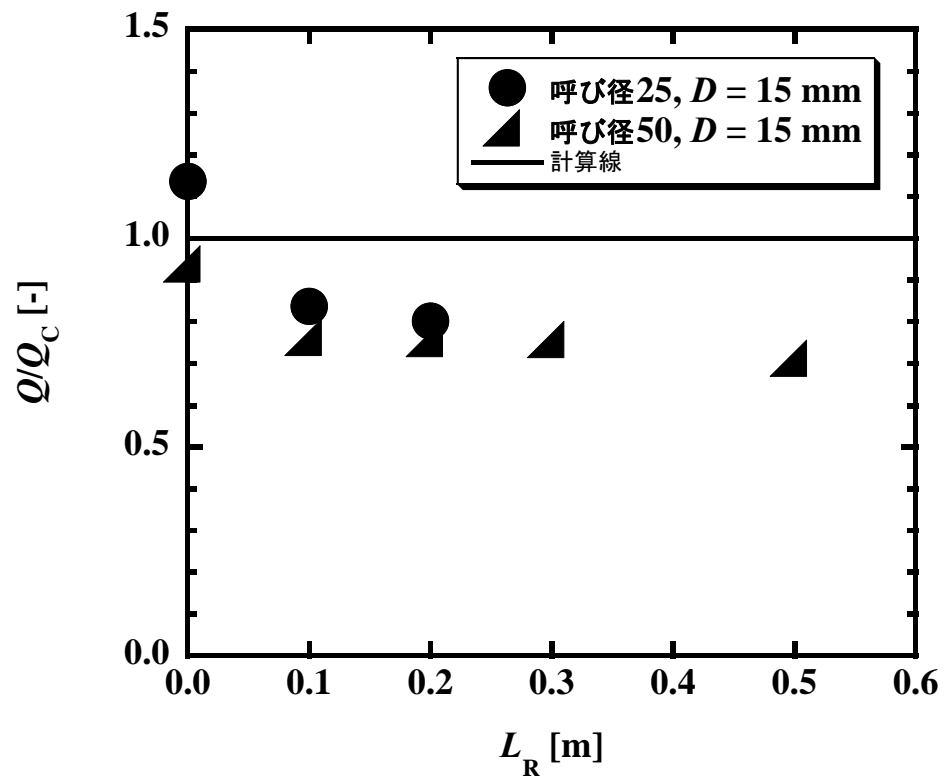


図 6.4-16 装置内径の影響( $h = 0.39$  m,  $\theta = 60^\circ$ )

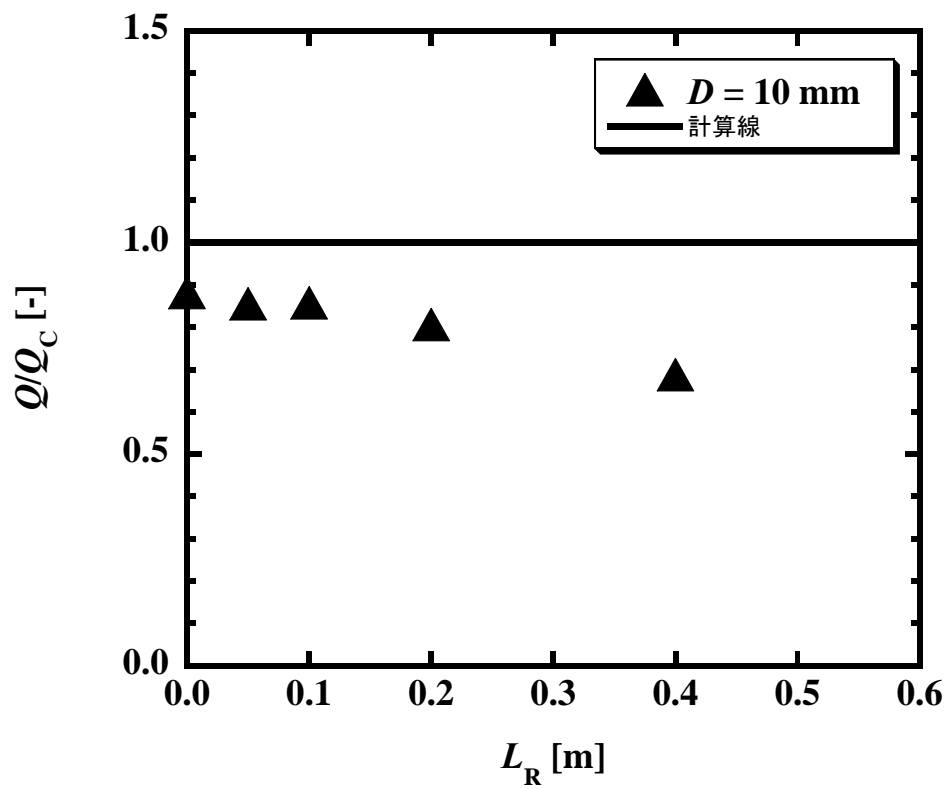


図 6.4-17 気体巻き込みの影響(呼び径 50 mm,  $h = 0.50$  m,  $\theta = 60^\circ$ )

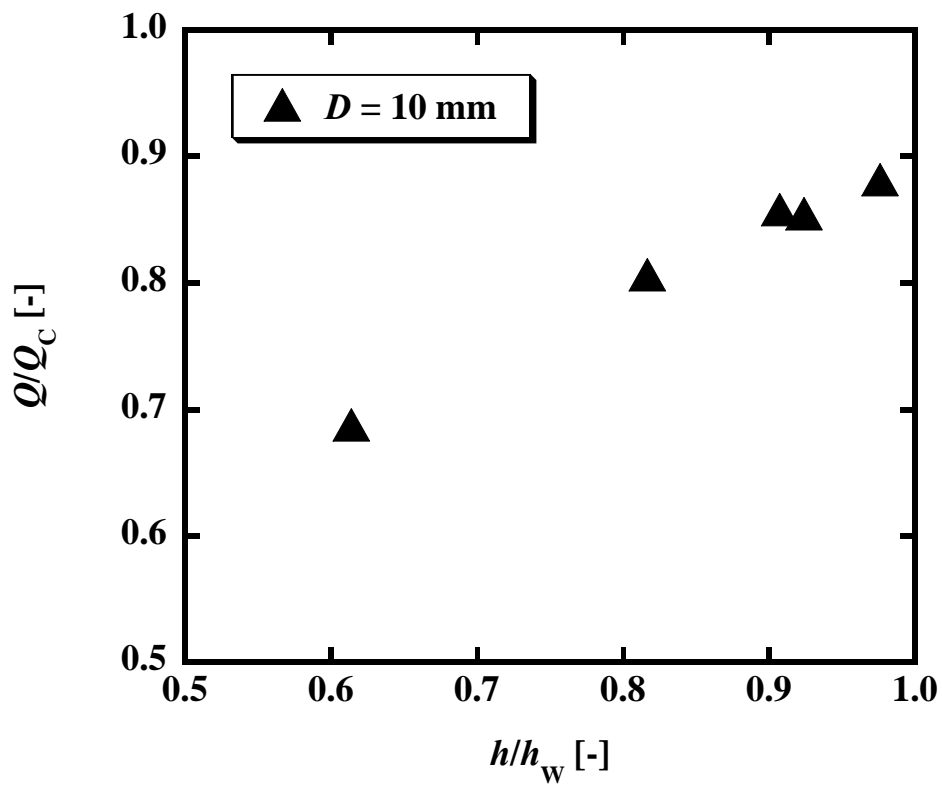


図 6.4-18  $Q/Q_c$  と  $h/h_w$  の関係(呼び径 50 mm,  $h = 0.50$  m,  $L_R = 0-0.4$  m,  $\theta = 60^\circ$ )



(a) 水面から約 0.2 m 離れた場合



(b) ホース先端を接触させた場合

図 6.4-19 アクリル樹脂管を用いた可視化実験

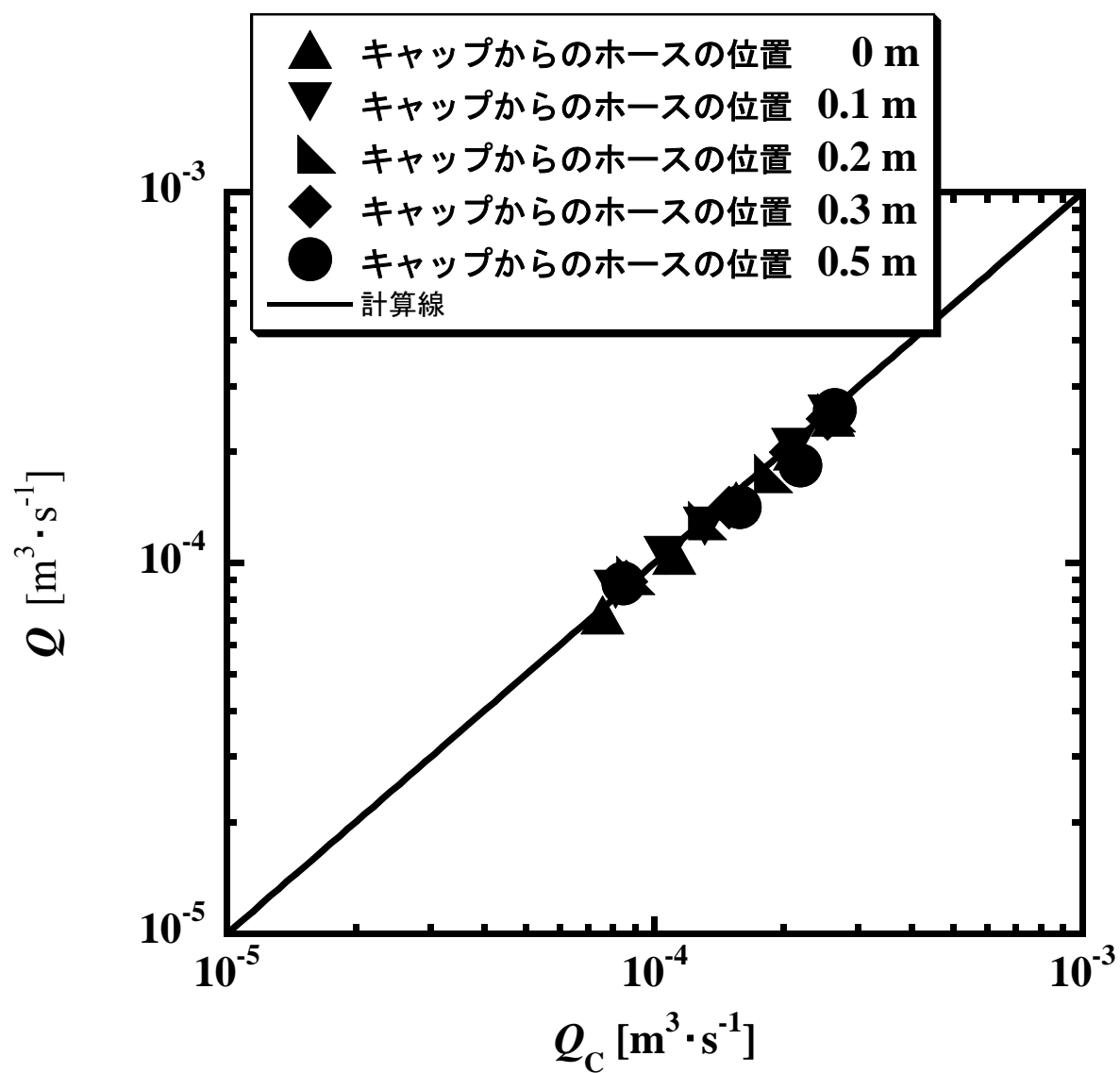


図 6.4-20 アクリルパイプ内にホースを設置した場合  
(呼び径 25 mm,  $h = 0.047\text{--}0.576$  m,  $D = 10$  mm,  $\theta = 60^\circ$ )



## 第7章 結論

本研究では、圃場整備などを通して農業を支援することを目的として、富良野盆地地区をモデルとして検討を行った。富良野盆地地区における土壌特性や地下かんがいシステムを備えた圃場の特性などを把握するため、土壌分析や種々の圃場内栄養塩の深さ方向分布の比較、用水流量測定法の設計・開発、土壌などの粒径分布測定方法に関する検討を行った。

第1章では、本研究の背景についてまとめるとともに既往の研究を紹介し、課題点を抽出した。

第2章では、課題点を解決するために不可欠な基本的情報である富良野盆地地区および農業関連事項をまとめた。

第3章では、富良野盆地の土壌に関する検討を行った。土壌水分と強熱減量には関係があること、イオン吸着量には粒径依存性があることを示した。また、富良野盆地南部の平地圃場における調査で、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ と硫酸イオン含有量の深さ方向分布に反比例関係が見られること、十勝岳泥流跡地である富良野川およびヌッカクシ富良野川から離れるほど十勝岳泥流の影響が小さくなる傾向にあることを明らかにした。圃場内での栄養成分分布を検討する場合、現在の圃場規模の場合、深さ方向分布に注意する必要があることを示した。

第4章では、圃場の水はけ等に影響を及ぼす農業資材および土壌の粒径分布を浮力秤量法によって測定した。その結果、農業用資材として用いられている炭酸カルシウムや土壌粒子の粒径分布測定が可能であることを示した。

第5章では、富良野盆地にある一般的なかんがい排水施設を備えた圃場と既設暗渠利用型の地下かんがいシステムを備えた圃場の違いを検討した。その結果、水田の作土層に関しては両圃場で大きな違いがないことを明らかにした。同様に畑地圃場の場合も同様であった。しかし、平地に位置する水田・畑地圃場と丘陵地に位置する畑地圃場では栄養成分分布などが異なっており、作土層下の影響を大きく受けていることを示した。

第6章では、地下かんがいシステムを導入した圃場の地下へ導く用水流量を簡便に測定する方法を検討した。その結果、水道用キャップを加工した堰式流量計、アクリル板を加工したオリフィス式流量計、水道用パイプを組み合わせた筒型流量計で流量測定が可能であることを示した。堰式、オリフィス式流量計については、富良野盆地地区の試験圃場で試験し、実圃場でも適用できることを確認した。

泥炭地でかつ硫酸酸性土壌である富良野盆地地区において得られた知見は、同様の他地区をはじめ、泥炭地地区、硫酸酸性土壌地区に応用可能である。今後は本研究で得られた知見・技術を活用して富良野盆地地区における農業の発展に貢献するとともに、開拓期における富良野盆地地区の取り組みが北海道農業のモデルとなったように、他地域へ知見・技術等を発信する所存である。

## 引用文献

### <第1章>

- 宮地直道, 神山和則, 大塚紘雄, 粕渕辰昭(1995): 美唄泥炭地における地盤沈下(第2報)－湿原と泥炭農用地の管理, 日本土壤肥料学会誌, **66**, 465-473.
- 近藤鍊三(1978): 北海道における泥炭土壌の化学的正常に関する研究(第1報), 日本土壤肥料学会誌, **49**, 90-99.
- 橋本均(2006): 北海道泥炭農耕地土壌の実態とその特性, 土壌の物理性, **103**, 87-94.
- 庄子貞雄, 松実成忠(1962): 泥炭土壌の化学的特性に関する究研(第4報)－泥炭土壌の陽イオン置換基の特性と有効置換容量について, 日本土壤肥料学会誌, **33**, 181-185.
- 石渡輝夫(2006): 北海道における泥炭農地整備技術の変遷と課題, **104**, 109-117.
- 中富良野町産業建設課(2007): 中富良野町農業要覧'05, 中富良野町, p.4.
- 上富良野町(1995): 十勝岳泥流地帯の化学的特性－富良野盆地の土壌, 河川水のイオウを中心とした物質の収支と秋落ち水田の改良対策－, 上富良野町.
- 福本昌人, 深山一弥, 小川茂男(1992): 粘土質転換畑における地下灌漑の適用性, 土壌の物理性, **64**, 11-20.
- 萩野芳彦, 村島和男(1985): 暗渠排水計画の理論的検討－汎用化耕地のための暗渠排水設計(1), 農業土木学会論文集, **119**, 1-6.
- 萩野芳彦, 村島和男(1990): 暗渠間隔決定のための実用的簡便法－汎用化耕地のための暗渠排水設計(5), 農業土木学会論文集, **149**, 53-59.
- 松原利文, 相川賢一郎, 山崎剛太郎, 杉町信幸(1985a): 地下灌漑時の土層中の水移動－重粘土転換畑における地下灌漑試験(第1報)－, 土壌の物理性, **52**, 18-24.
- 松原利文, 相川賢一郎, 山崎剛太郎, 杉町信幸(1985b): 調整水路式地下灌漑の適正な施設－重粘土転換畑における地下灌漑試験(第2報)－, 土壌の物理性, **52**, 25-29.
- 水野直治, 丸岡孔一, 稲津脩(1992): 1926年十勝岳泥流水田土壌のイオウと鉄の含有率, 日本土壤肥料学雑誌, **63**, 677-683.
- 宮地直道, 神山和則, 大塚紘雄, 粕渕辰昭(1995): 美唄泥炭地における地盤沈下, 日本土壤肥料学会誌, **66**, 465-473.
- 矢部勝彦, 谷川寅彦(1992): 地下灌漑に関する実験的研究－8－栽培条件下における多孔質管形状の検討, 農業土木学会論文集, **162**, 43-47.

- Zhang, J., K. Nagasawa, S. Suzuki, T. Nishimura and M. Kato (2007): Development of Subsurface Irrigation Technology by Utilizing Ceramic Pitcher –Effect of Pressure on Soil Moisture Movement inside Ceramic Pitcher–, *Journal of Arid Land Studies*, **17**, 113–121.
- 稲葉健司, 花山一典(2003): 圃場整備 既設暗きょを利用した地下かんがい技術, 圃場と土壌, **35**, 2–8.
- 北海道空知支庁東部耕地出張所(2006): 集中管理孔を利用した暗渠清掃と地下かんがい(パンフレット).
- 栗山雅文, 門叶秀樹, 原田英二(2000): 攪拌分散下における擬塑性分散相の最大安定滴径, 化学工学論文集, **26**, 745–748.
- 蓑嶋裕典, 松嶋景一郎, 篠原邦夫(2005): 噴霧乾燥造粒による顆粒径分布に関する実験的考察—バインダーを含む分散系スラリーの場合—, 化学工学論文集, **31**, 102–107.
- 化学工学会(1988): 化学工学便覧第5版, 丸善, pp.224–231.
- 福井国博, 水田寿雄, 柴満也, 尹治文, 吉田英人(1998): 沈降天秤法による粒度分布測定におけるデータ処理, 化学工学論文集, **24**, 928–933.
- Odén, S.(1925): The size distribution of particles in soils and the experimental methods of obtaining them, *Soil Science*, **19**, 1–35.
- 荒川正文, 下村玄, 今村晃, 矢沢尚彦, 横山藤平, 彼谷憲美(1984): 新しい遠心沈降式粒度分布測定装置, 材料, **33**, 1141–1145.
- Obata, E., Y. Ohira and M. Ohta(2009): New Measurement of a Particle Size Distribution by a Buoyancy Weighing-Bar Method, *Powder Technology*, **196**, 163–168.

## <第2章>

- 上原智昭, 中村英人, 佐藤清美(2008): 国営農地再編事業「富良野盆地地区」における農地整備工法について, 第52回(平成20年度)北海道開発技術研究会, 技-40, p.1.
- 上富良野町 (1995): 十勝岳泥流地帯の化学的特性-富良野盆地の土壌, 河川水のイオウを中心とした物質の収支と秋落ち水田の改良対策-, 上富良野町.
- 庄子貞雄(1976): 2 日本の土壌-⑥泥炭土, アーバンクボタ NO.13, (株)クボタ, 14–15.
- 大北土建工業(株)(1994): 創立50周年記念誌『飛翔』, 大北土建工業(株), 18–20.
- 土地保全調査事業全国協議会(1991): 日本の耕地土壌の実態と対策—新訂版—, 博友社, p.259.

富良野土地改良区(1975a)：富良野土地改良区史，富良野土地改良区，12－13.

富良野土地改良区(1975b)：富良野土地改良区史，富良野土地改良区，p.86.

富良野土地改良区(1975c)：富良野土地改良区史，富良野土地改良区，p.105.

富良野土地改良区(1975d)：富良野土地改良区史，富良野土地改良区，533－550.

富良野土地改良区(1975e)：富良野土地改良区史，富良野土地改良区，683－695.

富良野土地改良区(2009)：豊かな水と大地－水土里ネットふらの，富良野土地改良区，2－5.

富良野土地改良区(2010)：富良野土地改良区区域図，富良野土地改良区.

北海道開発局旭川開発建設部(2007a)：国営農業用水再編対策事業（地域用水機能増進型）『空知川右岸地区』事業誌，北海道開発局旭川開発建設部，p.61.

北海道開発局旭川開発建設部(2007b)：国営農業用水再編対策事業（地域用水機能増進型）『空知川右岸地区』事業誌，北海道開発局旭川開発建設部，216－220.

北海道立中央農業試験場(1975a)：土壌生産分級図並に土壌区分図，北海道立中央農業試験場.

北海道立中央農業試験場(1975b)：地力保全基本調査成績書（十勝岳西山麓地域，空知郡上富良野町中富良野町），北海道立中央農業試験場，7－27.

北海道立中央農業試験場(1992)：土壌および作物栄養の診断基準，北海道立中央農業試験場，1－172.

中富良野町産業建設課(2005)：中富良野町農業要覧'04，中富良野町，1－6.

中富良野町産業建設課(2010)：中富良野町農業要覧'09，中富良野町，1－6.

農林水産省(2005)：経営所得安定対策等大綱，農林水産省，1－6.

農林水産省(2010a)：食料・農業・農村基本計画，農林水産省，1－8.

農林水産省(2010b)：農業構造の展望－経営政策が目指す将来の農業ビジョン－，農林水産省，1－18.

### <第3章>

土質工学会（1983）：土の試験実習書－第一回改訂版－，土質工学会，5-8，83-94.

北海道中央農業試験場（1978）：地力保全基本調査総合成績書<1> 北海道，北海道立中央農業試験場.

中富良野町産業建設課(2007)：中富良野町農業要覧'05，中富良野町，p.4.

日本土壌協会 (2002)：土壌機能モニタリング調査のための土壌，水質及び植物体分析法，日本土壌協会.

上富良野町 (1995)：十勝岳泥流地帯の化学的特性-富良野盆地の土壌，河川水のイオウを中心とした物質の収支と秋落ち水田の改良対策-，上富良野町.

水野直治，丸岡孔一，稲津脩 (1992)：1926 年十勝岳泥流水田土壌のイオウと鉄の含有率，日本土壌肥料学雑誌，**63**, 677-683.

化学工学会(1988)：化学工学便覧 改訂五版，pp.239-241，丸善.

外島忍(1975)：要説 品質管理[増補改訂版]，pp.38-42, p.403 日本規格協会.

大平勇一，小幡英二，古川克彦，吉田豊(2004)；北海道の新ブランド“健康土壌”に関する研究，北海道開発協会平成 15 年度助成研究論文集，163-181.

#### <第 4 章>

落合謙一(1995)：活性水酸化マグネシウムの製造方法，特公平 7-33254.

栗山雅文，門叶秀樹，原田英二(2000)：攪拌分散下における擬塑性分散相の最大安定滴径，化学工学論文集，**26**, 745-748.

蓑嶋裕典，松嶋景一郎，篠原邦夫(2005)：噴霧乾燥造粒による顆粒径分布に関する実験的考察—バインダーを含む分散系スラリーの場合—，化学工学論文集，**31**, 102-107.

化学工学会(1988)：化学工学便覧第 5 版，丸善，pp.224-231.

福井国博，水田寿雄，柴満也，尹治文，吉田英人(1998)：沈降天秤法による粒度分布測定におけるデータ処理，化学工学論文集，**24**, 928-933.

Odén, S.(1925): The size distribution of particles in soils and the experimental methods of obtaining them, *Soil Science*, **19**, 1-35.

荒川正文，下村玄，今村晃，矢沢尚彦，横山藤平，彼谷憲美(1984)：新しい遠心沈降式粒度分布測定装置，材料，**33**, 1141-1145.

Obata, E., Y. Ohira and M. Ohta(2009): New Measurement of a Particle Size Distribution by a Buoyancy Weighing-Bar Method, *Powder Technology*, **196**, 163-168.

Allen, T.(1990): Particle size measurement, 4th edition, Chapman and Hall, London, pp.345-355.

大平勇一，小幡英二(2009)；酸化マグネシウムの水和速度におよぼす粒径の影響，化学工学論文集，**35**, 543-547.

古川克彦, 大平勇一, 小幡英二, 吉田豊(2010); 浮力秤量法による鉱物粒子の粒径分布測定, *Journal of MMIJ*, **126**, 577-582.

大平勇一, 古川克彦, ロンダントムブン, 島津昌光, 小幡英二(2010); 浮力秤量法: 新規な沈降法を用いた粒径分布測定, 堆積学研究, **69**, 17-26.

## <第5章>

土質工学会 (1983): 土の試験実習書-第一回改訂版-, 土質工学会, 5-8, 83-94.

上富良野町 (1995): 十勝岳泥流地帯の化学的特性-富良野盆地の土壌, 河川水のイオウを中心とした物質の収支と秋落ち水田の改良対策-, 上富良野町.

河端明, 関根忠隆, 平井勝久, 藤田明男 (2008): 生産性向上に向けた泥炭土壌の水田整備, 水土の知, **76**(10), 9-13.

福本昌人, 深山一弥, 小川茂男 (1992): 粘土質転換畑における地下灌漑の適用性, 土壌の物理性, **64**, 11-20.

萩野芳彦, 村島和男 (1985): 暗渠排水計画の理論的検討-汎用化耕地のための暗渠排水設計(1), 農業土木学会論文集, **119**, 1-6.

萩野芳彦, 村島和男 (1990): 暗渠間隔決定のための実用的簡便法-汎用化耕地のための暗渠排水設計(5), 農業土木学会論文集, **149**, 53-59.

櫃田木世子, 田中明 (1983): 作物栄養学的にみた酸性土壌の化学特性, 北海道大学農学部邦文紀要, **13**, 485-493.

平出重信, 渡邊眞紀子, 衣笠善博, 森島済, J. D. Rondal, M. B. Collado, 鈴木浩一 (2004): フィリピンラハール災害地域 Pasig-Potrero・Porac 川流域における地下水流動と地下水涵養, 地質雑誌, **113**, 461-481.

藤森新作 (2007): 転換作物の安定多収をめざす地下水位調節システム, 農業および園芸, **82**, 570-576.

北海道農政部 (2002): 北海道施肥ガイド, 北海道, 14-32.

北海道立中央農業試験場 (1978): 地力保全基本調査総合成績書<1> 北海道, 北海道立中央農業試験場.

松原利文, 相川賢一郎, 山崎剛太郎, 杉町信幸 (1985a): 地下灌漑時の土層中の水移動-重粘土転換畑における地下灌漑試験(第1報)-, 土壌の物理性, **52**, 18-24.

松原利文, 相川賢一郎, 山崎剛太郎, 杉町信幸 (1985b): 調整水路式地下灌漑の適正な施設-重粘土転換畑における地下灌漑試験(第2報)-, 土壌の物理性, **52**, 25-29.

水野直治, 丸岡孔一, 稲津脩 (1992): 1926年十勝岳泥流水田土壌のイオウと鉄の含有率, 日本土壌肥料学雑誌, **63**, 677-683.

- 宮地直道, 神山和則, 大塚紘雄, 粕渕辰昭 (1995): 美唄泥炭地における地盤沈下, 日本土壤肥料学会誌, **66**, 465–473.
- 日本土壤協会 (2002): 土壤機能モニタリング調査のための土壌, 水質及び植物体分析法, 日本土壤協会, p.39.
- 大峽広智, 小巻義幸, 尾和尚人 (2004): 酸性硫酸塩土壌の生成過程における化学性および硫黄酸化細菌・鉄酸化細菌数の経時的変化, 新潟大学農学部研究報告, **57**, 47–51.
- 新谷融, 清水収, 西山泰弘 (1991): 十勝岳火山山麓における火山泥流と土砂災害の発生履歴に関する研究, 北海道大学農学部演習林研究報告, **48**, 191–232.
- 矢部勝彦, 谷川寅彦 (1992): 地下灌漑に関する実験的研究-8- 栽培条件下における多孔質管形状の検討, 農業土木学会論文集, **162**, 43–47.
- Zhang, J., K. Nagasawa, S. Suzuki, T. Nishimura and M. Kato (2007): Development of Subsurface Irrigation Technology by Utilizing Ceramic Pitcher –Effect of Pressure on Soil Moisture Movement inside Ceramic Pitcher–, *Journal of Arid Land Studies*, **17**, 113–121.

## < 第 6 章 >

- 稲葉健司, 花山一典(2003): 圃場整備 既設暗きょを利用した地下かんがい技術, 圃場と土壌, **35**, 2–8.
- 亀井三郎(1975): 化学機械の理論と計算 第2版, 産業図書, pp. 49–54.
- 橋本均, 志賀弘行(1993): 北海道土壌区一覧, 北海道立農業試験場資料.
- 北海道空知支庁東部耕地出張所(2006): 集中管理孔を利用した暗渠清掃と地下かんがい(パンフレット).
- 沖巖(1935): 両側に縮流のある四角堰の流量係数研究の一方法, 機械学会論文集, **1**, 275–277.
- 大平勇一, 藤永祐太, 古川克彦, 小幡英二, 吉田豊(2008): 地下かんがいシステム用堰式流量計の開発, 開発技報, **49・50**, 33–40.
- 鈴木勲, 古川克彦, 大平勇一, 小幡英二, 吉田豊(2010): 地下かんがいシステム用オリフィス流量計の開発, 開発技報, **51**, 16–23.

## 謝辞

本研究の遂行並びに本論文をまとめるにあたりご指導・ご鞭撻を賜りました室蘭工業大学大学院工学研究科くらし環境系領域・吉田豊教授に深く感謝するとともに、心から御礼申し上げます。また、数々のご指導をいただきましたくらし環境系領域後藤龍彦教授，同・小幡英二教授，同・大平勇一准教授に厚く御礼申し上げます。

研究を実施するにあたり間山幸雄氏，西原淳一氏，坂東勝明氏，布施芳秋氏，藪義紀氏，山沢弘三氏，吉田清一氏，石神弘嘉氏，梅本哲昭氏，大谷國男氏から圃場を提供していただきました。また，室蘭工業大学大学院応用化学専攻 赤間毅氏，鈴木裕輔氏，森山美保子氏，松野克則氏，佐藤伸之氏，森秀樹氏，飛渡史穂氏，藤永裕太氏，同応用理化学系専攻 鈴木勲氏，工学部応用化学科 絹伸也氏，山田洋平氏，中田ちあき氏，堀川雄司氏，山本浩平氏，武岡孝多氏，坂本恵美氏，佐藤萌氏，前川千尋氏，巖貴之氏，桜庭可奈子氏，上野真理氏，福田雄太氏，株式会社タクマ 太田智久氏，富良野土地改良区 長尾栄治理事長，佐々木秀範参事，太田敦春工務課長の協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

本研究の一部は，(財)北海道開発協会が行った平成 15 年度助成研究，(独)科学技術振興機構が行った平成 21 年度シーズ発掘試験として実施したことを記して謝意を示します。

最後に，博士後期課程への進学を後押ししていただいた大北土建工業株式会社 荒木毅社長，平山正幸専務取締役，本研究の推進に協力いただいた大北グループの皆さまに心から感謝申し上げます。